

El proyecto del buque basado en el riesgo

Trabajo de fin de grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Rubén Barba Arias

Dirigido por:
Jaime Rodrigo de Larrucea

Grado en sistemas y tecnologías navales

Barcelona, mayo 2019



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona



Resumen

Este trabajo se inicia a raíz de la siguiente pregunta: ¿Es la normativa actual capaz de garantizar la seguridad de los buques de hoy en día teniendo en cuenta el gran desarrollo tecnológico de la industria marítima en los últimos años? Es inevitable darse cuenta que el desarrollo tecnológico promueve la construcción de buques con diseños cada vez más arriesgados. La normativa actual se ha elaborado basada en accidentes del pasado, pero las necesidades que tenían los buques de entonces no son las mismas de ahora. Este escrito propone el uso de un nuevo método para evaluar la seguridad de nuestras naves: La Evaluación Formal de la Seguridad (EFS).

Basado en el trabajo del proyecto SAFEDOR, este trabajo a parte de tener un objetivo de concienciación, pretende servir como una guía para implementar esta metodología en un proceso de diseño. Se explican claramente todos los pasos de la EFS en forma de pauta y de una manera sistemática y transparente para que pueda ser fácilmente entendible.

Tabla de contenidos

Resumen	iii
Listado de figuras	vii
Capítulo 0 Introducción	9
0.1 Antecedentes	9
0.2 El diseño basado en el riesgo	10
0.3 Rol de la OMI	10
Capítulo 1 El proyecto SAFEDOR	12
1.1 La necesidad del diseño del buque basado en el riesgo	12
1.2 El concepto de riesgo	14
1.3 Primeros pasos del diseño basado en el riesgo	15
1.3.1 Cálculo probabilístico de estabilidad en averías y el proyecto HARDER	15
1.3.2 Análisis de fiabilidad estructural	18
1.3.3 Diseño alternativo del sistema de protección contra incendios	19
1.3.4 Diseño alternativo para petroleros	19
1.4 ¿Qué se necesita para realizar un diseño basado en el riesgo?	19
1.4.1 Marco normativo	20
1.4.2 Marco teórico para el diseño basado en el riesgo	20
1.4.3 Equipo de trabajo e ingenieros cualificados	21
Capítulo 2 Diseño del buque para la seguridad	22
2.1 Diseño tradicional del buque	22
2.1.1 Proyecto conceptual	23
2.1.2 Proyecto contractual	24
2.1.3 Proyecto de construcción	25
2.2 Diseño del buque basado en normas	26
2.3 Diseño del buque basado en el riesgo	31
2.3.1 Conceptos clave del diseño del buque	33
Capítulo 3 Evaluación Formal de la Seguridad	37
3.1 Antecedentes	37
3.2 ¿Qué es la Evaluación formal de la seguridad? (EFS-FSA)	38
3.3 Pasos de la EFS	39
3.4 Paso preparatorio	41
3.5 Paso 1 - Identificación de peligros (HAZID)	42
3.5.1 Introducción	42
3.5.2 Modelo probabilista vs Modelo determinista	45

3.5.3	Clasificación de peligros	47
3.5.4	Matriz de riesgo	47
3.6	Paso 2 - Análisis del riesgo	50
3.6.1	Introducción	50
3.6.2	Tipos de análisis de riesgo	50
3.6.3	Árbol de fallos (<i>Fault Tree Analysis, FTA</i>)	51
3.6.4	Árbol de sucesos (<i>Event Tree Analysis, ETA</i>)	55
3.6.5	Análisis de fiabilidad operativa. HAZOP (<i>Hazard Operability</i>)	58
3.5.6	Conclusión	61
3.6	Paso 3 – Opciones de control del riesgo (RCO)	61
3.7	Paso 4 - Análisis coste-beneficio	63
3.8	Paso 5 - Recomendaciones para la toma de decisiones	67
3.8.1	Criterio ALARP, “tan bajo como sea razonablemente posible”	68
3.8.2	Otros criterios de riesgo	69
Capítulo 4 Conclusiones		72
Bibliografía		74
Monografías y artículos:		74
Páginas web:		75

Listado de figuras

<i>Figura 1: Nuevos cruceros de MSC para el año 2019. Fuente:</i> <i>https://cruceroland.com/</i>	14
<i>Figura 2: Nuevo proceso de optimización del diseño del buque para la estabilidad en avería. Fuente: Papanikolau, A. (2009). Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications</i>	18
<i>Figura 3: Espiral de diseño del buque. Fuente:</i> <i>http://arquitecturabuque.blogspot.com/es/</i>	23
<i>Figura 4: Proceso genérico de diseño de un buque. Fuente: Papanikolau, A. en Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications</i>	27
<i>Figura 5: Fase 1 del diseño del buque: concepto y normativa. Fuente: Papanikolau, A. en Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications</i>	28
<i>Figura 6: Cada nueva regla aparece a raíz de un accidente. Fuente propia.</i>	29
<i>Figura 7: Un punto de vista más “responsable” para el diseño de la seguridad. Fuente: Papanikolau, A. en Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications</i>	31
<i>Figura 8: Proceso de evaluación de seguridad introducido en el proceso de diseño tradicional. Fuente: Papanikolau, A. (2009). Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications</i>	33
<i>Figura 9: Enlaces estructurales de escenarios de riesgo. Fuente propia.</i>	36
<i>Figura 10: Desastre de la plataforma petrolífera Piper Alpha, 1988. Fuente:</i> <i>http://theconversation.com/</i>	37
<i>Figura 11: Ilustración de un proceso de Evaluación Formal de la Seguridad. Fuente propia.</i>	40
<i>Figura 12: Proceso de la EFS con los pasos 5 diferenciados. Fuente: Risk Management Techniques & FSA: “New Marine Fuels & Safety Risks”</i>	41
<i>Figura 13: Pirámide jerárquica de gestión del riesgo. Fuente</i> <i>http://oshpolisasmhn.blogspot.com/2017/03/chapter-6-hirarc.html</i>	44
<i>Figura 15: Tabla de índices de severidad. Fuente: MSC/Circ.1023</i>	48
<i>Figura 14: Tabla de índices de frecuencia. Fuente: MSC/Circ.1023</i>	48
<i>Figura 16: Matriz de riesgo 7x4. Fuente: MSC/Circ.1023</i>	49
<i>Figura 17: Simbología utilizada para la representación de árbol de fallos. Fuente:</i> <i>http://www.proteccioncivil.es/</i>	52
<i>Figura 18: Estructura explicada de un árbol de fallos. Fuente: https://www.aec.es/</i>	53
<i>Figura 19: Ejemplo de árbol de fallos, extraído del documento “Formal Safety Assessment in Maritime Industry – Explanation to IMO Guidelines” de Eswara Arun Kishore, 2013</i>	54

<i>Figura 20: Esquema general de un árbol de sucesos. Fuente propia.</i>	56
<i>Figura 21: Ejemplo de un árbol de sucesos. Fuente: Rausand.M (2004), NTNU; System Reliability Theory.</i>	57
<i>Figura 22: Tabla de palabras guía para técnica HAZOP. Fuente: NTP 238, Los análisis de peligros y de operatividad en instalaciones de proceso</i>	60
<i>Figura 23: Ejemplo de RCO seleccionados en una EFS para cruceros. Se pueden observar combinaciones de varios RCO. Fuente:</i> <i>http://www.safedor.org/resources/MSC_85-17-1.pdf</i>	63
<i>Figura 24: Tabla con valores imaginarios de los CAF's. Fuente propia.</i>	66
<i>Figura 25: Gráfico ALARP que muestra las diferentes zonas de riesgo. Fuente</i> <i>https://es.wikipedia.org/wiki/ALARP</i>	68
<i>Figura 26: Ejemplo de diagrama F-N. Fuente</i> <i>https://blogs.dnvgl.com/oilgas/safety/risk-criteria/</i>	71

Capítulo 0 Introducción

Normalmente cuando se trata de diseñar cualquier tipo de método de transporte, ya sean vehículos terrestres, aviones o barcos, siempre preferimos viajar en un vehículo diseñado explícitamente para garantizar nuestra seguridad. ¿Pero existe algo que sea completamente a prueba de fallos o libre de riesgos? La tecnología avanza de forma exponencial, cada vez se ven buques más tecnológicos, que desafían el propio conocimiento y que están dispuestos a romper las barreras de lo imaginable, al fin y al cabo, el progreso es precisamente eso. Pero, ¿está la normativa actual preparada para afrontar estos cambios? Las reglas que garantizan la seguridad en nuestros buques están basadas precisamente en antiguos buques que han sufrido accidentes. No existe una visión responsable de la seguridad, se trata como una restricción y no como una variable en el proceso de diseño. Ya están empezando a ser necesarias nuevas soluciones de seguridad marítima por que las reglas actuales son incapaces implementarse y muchos diseños revolucionarios se tienen que tirar atrás. La ideología representada en este proyecto se encuentra fundamentada en el libro: Seguridad marítima: Teoría general del Riesgo, de Jaime Rodrigo de Lacurreea.

Jaime Rodrigo es doctor en Derecho y en Ingeniería Náutica, académico numerario de la Real Academia de Doctores y autor de numerosas obras como en la que está fundamentada este escrito. En ella, el autor propone una teoría general del riesgo en la seguridad marítima indicando que esta está basada en una actitud. Aborda la seguridad marítima desde una perspectiva global, analizando todos sus elementos: las normativas, el proyecto del buque y diseño, el control preventivo, factor humano, gestión operacional del buque, la protección del buque y las instalaciones portuarias, la contaminación marítima y por último la investigación.

0.1 Antecedentes

Si la historia nos ha enseñado algo sobre la navegación, es que no basta con ser prudente. Uno de los buques más famosos de todos los tiempos, el Titanic, fue considerado el buque “insumergible”. Presumía de disponer de todos los medios de seguridad al alcance de la época, pero, como todos sabemos, no fue suficiente. El Titanic sufrió un accidente y se hundió, con una pérdida de vida humana nunca

antes vista en la historia de la navegación marítima, y esa es la verdadera razón por la que hoy en día se conoce la historia del buque “insumergible”.

Si podemos sacar algo positivo de dicha tragedia sucedida hace ya más de un siglo, es que no existe buque que sea insumergible, y debemos hacer todo lo posible para optimizar constantemente los buques que se construyen hoy con la esperanza de no volver a sufrir el mismo destino que el Titanic.

0.2 El diseño basado en el riesgo

La idea que hay detrás del diseño basado en el riesgo es mirar con ojo crítico el diseño de los buques existentes y detectar dónde está su vulnerabilidad y como prevenir posibles desastres. Cada buque, en su fase inicial, tiene puntos débiles y es responsabilidad de los diseñadores implementar un enfoque basado en el riesgo en aras de identificar dichas vulnerabilidades y optimizar el diseño para ofrecer el máximo nivel de protección. Sin embargo, el diseño basado en el riesgo debe implementarse de una manera práctica, pues aun con todos los requisitos de seguridad el buque debe seguir pudiendo navegar de una manera eficiente.

Además, para los buques que se diseñan actualmente, el concepto de diseño basado en el riesgo es asegurarse que cualquier barco que se construya de ahora en adelante cumple con los requisitos de seguridad estipulados sin que sea necesario ralentizar construcción y su botadura. La identificación temprana y previsión de los riesgos para a continuación ser eliminados, es la idea principal del concepto.

0.3 Rol de la OMI

A nivel de las Naciones Unidas, la seguridad del buque en la mar está bien regulada por la Organización Marítima Internacional (OMI). Hoy en día ya se puede observar una tendencia a pasar de normas prescriptivas a normas basadas en objetivos (GBS). Paralelamente, los avances tecnológicos y la necesidad de desarrollar soluciones marítimas más económicas promueven la innovación y el análisis de riesgos se está convirtiendo en un elemento importante para el desarrollo de los nuevos buques. Es por este motivo por el que en las últimas décadas se ha diseñado un proceso de diseño de buques que integra el análisis de riesgos mediante el desarrollo e implementación de nuevas normas en el marco regulatorio de la OMI.

Hoy en día, todos los elementos principales del diseño de buques basados en el riesgo se están desarrollando y las primeras aplicaciones demuestran su viabilidad en la práctica.

Capítulo 1 El proyecto SAFEDOR

El diseño basado en el riesgo es un nuevo campo científico e ingeniería de creciente interés para investigadores, ingenieros y profesionales de varias disciplinas relacionadas con el mundo del diseño naval, construcción, operación e inspección. Las aplicaciones de este tipo de enfoque en la industria marítima comenzaron a principios de la década de los 60 con la introducción del concepto de *estabilidad probabilística en averías del buque*.

La motivación principal para utilizar el diseño basado en el riesgo es la siguiente: implementar en el mundo marítimo diseños de buques novedosos que sean considerados seguros pero que no pueden aprobar hoy en día y/o optimizar un diseño existente –en términos de seguridad marítima- sin comprometer la eficiencia del buque. Bajo estas motivaciones fue como se creó el proyecto SAFEDOR.

El proyecto SAFEDOR (Design, Operation and Regulation for Safety) empezó en Febrero del año 2005 y se consolidó en Abril del 2009. La premisa principal de este proyecto es el diseño, la operación y el reglamento del buque basado en el riesgo. SAFEDOR se formó bajo la coordinación de Germanischer Lloyd junto con 52 organizaciones europeas como representantes de las partes interesadas de la industria marítima europea.

1.1 La necesidad del diseño del buque basado en el riesgo

Durante décadas la humanidad ha presenciado diversos accidentes (no únicamente marítimos), con una enorme pérdida de vidas humanas, recursos y daños al medio ambiente. Es por este motivo que durante las últimas décadas, la preocupación por el desarrollo sostenible de la seguridad y el bienestar de las personas y la responsabilidad para la conservación del medio ambiente ha ido creciendo. Al mismo tiempo, la correcta asignación de recursos tanto naturales como financieros se considera altamente importantes. Por este motivo, la nueva metodología de análisis de riesgos en todas las disciplinas de ingeniería, desarrollados durante las últimas décadas, son cada vez más importantes y útiles como herramienta de apoyo en la toma de decisiones para aplicaciones de ingeniería. La integración de estos métodos de análisis de riesgos como herramienta, conduce directamente al “diseño basado en el riesgo”.

La innovación en la industria del transporte (industria aeroespacial, automotriz y ferroviaria) ha sido impulsada en gran medida por la seguridad. Como ocurre por ejemplo en la industria automotriz con la innovación en neumáticos para proporcionar mayor adherencia y resistencia al pinchazo o las pruebas de choques que han demostrado a los clientes que los vehículos con elementos disipadores de energía integrados, “airbag” para protección contra impactos laterales o frontales, etc. proporcionan mayor seguridad en accidentes. Por otro lado, la seguridad de los buques está bien regulada a nivel de las Naciones Unidas por la Organización Marítima Internacional (OMI) en lugar de confiar en la responsabilidad de la seguridad de los fabricantes individuales o de las administraciones nacionales. Sin embargo, el desarrollo de las normas de seguridad marítima ha sido hasta hace poco impulsado principalmente por eventos individuales en lugar de un enfoque proactivo y holístico. Cada gran accidente catastrófico ha llevado crear una nueva normativa pensada para evitar que se vuelva a repetir dicho accidente. Sin embargo, no podemos permitirnos el lujo de tener que esperar a que ocurra un accidente para elaborar posteriormente la restricción, debemos anticiparnos al accidente para evitar fatales consecuencias. Es así como hoy en día está surgiendo una clara tendencia a pasar de regulaciones prescriptivas a regulaciones basadas en objetivos.

En referencia a cómo afecta el desarrollo de la seguridad en la industria marítima, este impulsa a que se puedan desarrollar cada vez barcos más y más innovadores. Por ejemplo, los cruceros más recientes tienen centros comerciales enteros dentro de la propia superestructura del barco junto con transportadores de gas natural comprimido. El crecimiento y la implementación del diseño basado en el riesgo en la industria marítima es también una gran noticia para los armadores, ya que podrán apostar por construir buques innovadores introduciendo soluciones que no hubiesen sido aprobadas con las anteriores normas prescriptivas debido a sus limitaciones, pero que si tienen cabida dentro del diseño basado en el riesgo. Los astilleros y fabricantes de sistemas y equipos también se beneficiaran de este tipo de enfoque al implementarse en la industria marítima buques que utilizan sistemas novedosos y que incorporen nuevas funciones y materiales. Básicamente, los astilleros son los primeros que reciben la demanda de los armadores, que se verían inmediatamente influenciados por los nuevos barcos.



Figura 1: Nuevos cruceros de MSC para el año 2019. Fuente: <https://cruceroland.com/>

Aunque inicialmente el diseño basado en el riesgo estaba enfocado principalmente a buques de pasajeros, se han ido desarrollando aplicaciones para los buques de carga¹

1.2 El concepto de riesgo

Para lograr el objetivo que se busca con el diseño basado en el riesgo se introduce un nuevo concepto dentro del proceso de diseño: el análisis del riesgo. El objetivo de este análisis es hacer del riesgo algo medible y cuantificable. De esta manera, se puede proponer el riesgo como un objetivo primario en el proceso de diseño, junto con objetivos primarios del diseño tradicional como la capacidad de carga y la velocidad del buque. Para medir el nivel de riesgo, se utilizan herramientas de cálculo avanzadas para cada caso particular de buque, las cuales se verán más adelante.

Se espera que con la introducción de la seguridad como objetivo en el proceso de diseño en lugar de ser tratado como una restricción, generará la exploración de nuevas soluciones técnicas.

Aunque tal y como se ha mencionado, el diseño basado en el riesgo se asocia principalmente a la introducción de objetivos de seguridad en el proceso de diseño,

¹ Ver MSC 76 / INF.15 y MSC 82/23/3

se pueden identificar claramente dos motivaciones distintas para hacer uso de este tipo de enfoque:

- Primero, es encontrar una manera de llevar a cabo un proyecto o una idea que a priori estaría limitado por el reglamento actual (que probablemente este desactualizado u obsoleto) o que directamente lo incumple. Esto no significa que este método pretenda saltarse el reglamento actual para poder implementar la solución técnica deseada, si no que pretende poder identificar los problemas y demostrar que la nueva solución es al menos tan segura como se requiere. Para ello se pueden establecer criterios de aceptación de los cuales hablaremos más adelante.
- Segundo, la optimización de un buque existente, por ejemplo, consiguiendo aumentar el nivel de seguridad con los mismos costes o aumentar la eficiencia del buque manteniendo el mismo nivel de seguridad.

Así pues, para llevar a cabo cualquier variante del diseño basado en el riesgo, basada en una motivación u otra, es necesario usar la misma tecnología y las mismas referencias que se derivan de introducir la seguridad como un objetivo medible en el proceso de diseño.

1.3 Primeros pasos del diseño basado en el riesgo

Muchas de las alternativas a la normativa prescriptiva de antaño, nacieron de la propia necesidad demandada por la industria. Cada diseño alternativo propuesto y llevado a cabo con éxito, evidenciaba la utilidad del diseño basado en el riesgo, y abría una puerta a la exploración de más y más posibilidades. A continuación se describen los primeros ejemplos de diseños alternativos que promovieron el diseño basado en el riesgo.

1.3.1 Cálculo probabilístico de estabilidad en averías y el proyecto HARDER

El diseño del buque basado en el riesgo empezó a principios de los años 60 con el concepto de cálculo probabilístico de estabilidad en averías, pero tardó más de una década en ser introducido oficialmente en el SOLAS. Esta normativa, que esta especificada en el SOLAS II-2 norma 25, ofrece la posibilidad de utilizar una solución probabilística alternativa siempre y cuando ofrezca como mínimo el mismo grado de seguridad que la opción determinista y además se deberá informar

individualmente a la OMI de dicho cambio. Para ejemplificar el sistema determinista de hoy día, se tomará como ejemplo la norma citada anteriormente, que a grandes rasgos dice lo siguiente: para garantizar la seguridad de estabilidad en averías se requiere un índice de compartimentado A (obtenido) que sea igual o mayor al índice de compartimentado R (requerido). Este índice R está basado en buques existentes que tienen un nivel de seguridad satisfactorio y que además ha sido demostrado, basado en la eslora del buque, las personas a bordo y la capacidad del bote salvavidas. El índice A se calcula mediante el producto de la probabilidad de inundación de cada compartimento por su contribución a la probabilidad total de hundimiento del buque. Pero, ¿es esto suficiente para asegurar la estabilidad en averías del buque? En ningún momento se incluye ningún aspecto operativo en el índice R requerido.

Estas reglas se han ido modificando en las últimas décadas, basándose cada vez más en un modelo probabilístico y dejando atrás el modelo determinista. Estas utilizan los resultados de varios accidentes y colisiones registrados por la OMI. Se basan en pura estadística, y por lo tanto se considera un método mucho más realista que el modelo determinista utilizado hasta el momento. Durante todo este camino, un equipo de sociedades de clasificación, centros de investigación, universidades e industrias europeas decidieron presentarse ante la Comisión Europea y proponer la elaboración del proyecto HARDER, para el cual recibieron financiación. Este proyecto tenía como objetivo estudiar la validez de este método así como nuevos posibles diseños de buques. Uno de los grupos de trabajo de este proyecto estaba encargado de presentar los resultados parciales del mismo al Subcomité SLF (Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety) de la OMI, encargado de la redacción de los criterios armonizados. El trabajo de este proyecto se basó principalmente, en el análisis de una base de datos de más de 2900 casos de accidentes marítimos.

En septiembre de 2003 el trabajo del proyecto HARDER se aprobó para ser utilizados como base para la redacción de nuevos criterios de estabilidad en averías del buque, enviándose al subcomité SLF en 2004 y al MSC (Comité de seguridad marítima) en 2005 para su aprobación final.

Los estudios realizados por el proyecto HARDER², permitieron la elaboración de una distribución de probabilidad de avería en función de la eslora. A partir de esta distribución es de donde se obtiene el valor de “p” para cada caso de avería considerado. Para hallar el valor “p” se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Factor “r”: representa la probabilidad de que los espacios más cercanos a la línea de crujía no se inunden, es decir, cuando existe un compartimentado longitudinal.
- Factor “s”: representa la probabilidad de que el buque sobreviva a una inundación considerada. Este factor estima la capacidad de supervivencia del buque según un rango de escoras. Para calcular este factor se debe hacer un análisis de supervivencia que tiene en cuenta distintas condiciones intermedias de inundación que afecten a la escora, como por ejemplo, el viento, pasaje a una banda y embarcaciones de salvamento.

Estos nuevos criterios representan un salto de importancia, y muy especialmente para el caso de los buques que usualmente se han clasificado según las reglas SOLAS 90, ya que en este caso también cambia por completo el procedimiento de evaluación de estabilidad.

La siguiente imagen representa el actual proceso de diseño de un buque basándose en los nuevos criterios de estabilidad en averías. Todas las partes implicadas deberán tomar parte en esta etapa del diseño, desde armador, astilleros y diseñador, para que esta etapa de optimización sea lo más satisfactoria posible.

² Maritime Safety Committee. (2009). FSA - Dangerous Goods Transport with Open-Top container vessels (MSC87/INF.2). Recuperado de <http://www.safedor.org/resources/MSC87-INF.2.pdf>

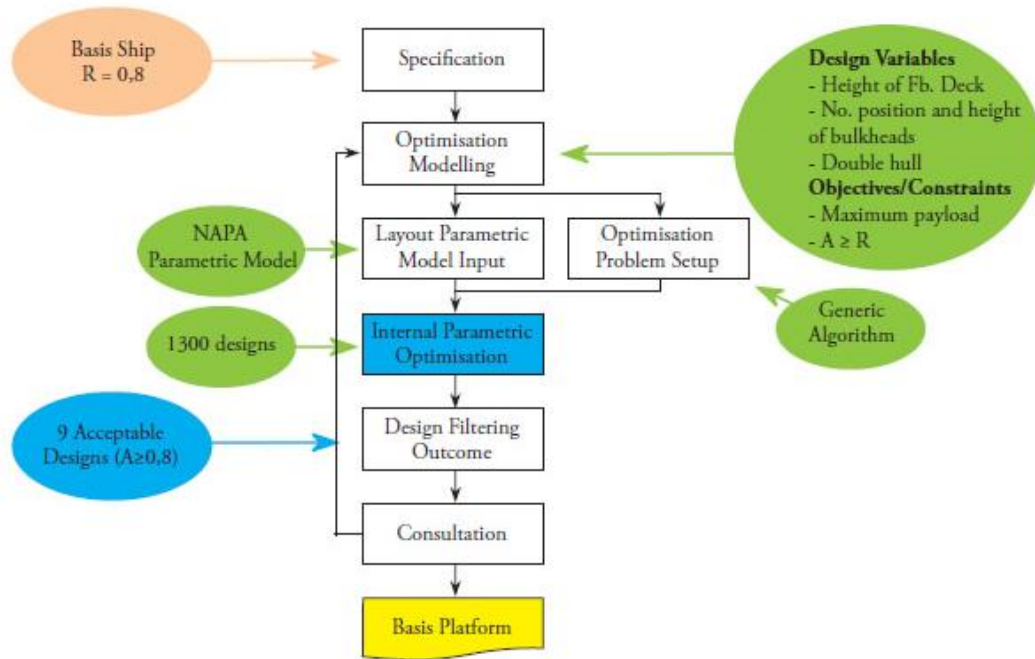


Figura 2: Nuevo proceso de optimización del diseño del buque para la estabilidad en avería. Fuente: Papanikolau, A. (2009). *Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications*

Finalmente, la decisión tomada fue la de considerar un único índice R (diferenciando entre buques de pasaje y de carga), por lo que aquellos diseños que presentaban unos niveles de supervivencia inferiores, han visto incrementados los requisitos que deberán cumplir. Por lo tanto, será necesario modificar los diseños actuales para obtener valores de supervivencia, actuando sobre los factores geométricos del buque, sobre su subdivisión interna y sobre sus condiciones de carga.

1.3.2 Análisis de fiabilidad estructural

En los años 70, cuando se demostró que se podía desarrollar una teoría basada en la probabilidad que vincula la fiabilidad de una estructura con la normativa, se creó una nueva disciplina en el campo de la ingeniería llamada “Análisis de fiabilidad estructural”. Este análisis basado en el riesgo sirve para desarrollar y documentar reglas que hagan referencia a la estructura del buque. Esta teoría se ha desarrollado durante más de 40 años, cuyos métodos y terminología se pueden encontrar en el CEN (2002).

1.3.3 Diseño alternativo del sistema de protección contra incendios

El desarrollo del SOLAS II.2 regla 17, comenzó a finales de los años 80 con el diseño del crucero “Sovereign of the Seas” y permite implementar un diseño alternativo para la protección contra incendios del buque. El “Sovereign of the Seas” tenía un espacio público, como un atrio que se extendía a tres cubiertas y se encontraba dentro de una zona de fuego. Más adelante el ferry “Color Fantasy” de clase Ultra-Voyager tiene atrios que se extienden sobre cuatro zonas de fuego. La libertad de diseño introducida por este tipo de regulaciones del SOLAS facilita la optimización en el proceso de diseño del buque y permite la introducción de diseños más novedosos.

Actualmente existen varios softwares que permiten analizar el rendimiento de evacuación de un buque para poder optimizar su diseño, además de la existencia de pautas publicadas por la OMI para el análisis de protección contra incendios.

1.3.4 Diseño alternativo para petroleros

Para los petroleros, la regla 19 exige la existencia de doble casco en este tipo de buques. Sin embargo, el párrafo 5 de dicha regla habla de otros métodos de diseño y construcción alternativos que serán tomados como válidos siempre y cuando demuestren el mismo o más nivel de protección contra la contaminación por fuga de hidrocarburos en caso de colisión o varada que los prescriptivos.

Sin embargo, la aprobación de este nuevo diseño alternativo, debe contar primeramente con la aprobación por parte de la OMI y el MEPC (Comité de Protección del Medio Marino), cosa que ha limitado en gran medida las innovaciones en esta área.

1.4 ¿Qué se necesita para realizar un diseño basado en el riesgo?

Hasta ahora se ha explicado en que consiste SAFEDOR y su diseño del buque basado en el riesgo, se ha detallado la utilidad de esta ideología, y se han mencionado algunos antecedentes que nos llevan hasta el diseño que se está aplicando hoy en día en el ámbito de la seguridad marítima. Pero, ¿Cómo se lleva a cabo? A continuación se explicarán a grandes rasgos los procedimientos operativos y legales que son necesario para el diseño del buque basado en el riesgo y su aprobación por las autoridades.

1.4.1 Marco normativo

Es necesaria la existencia de un conjunto de reglas que engloben la normativa de la OMI, sociedades de clasificación, reglamento nacional y regional y finalmente la normativa impuesta por la industria.

Para facilitar el diseño del buque basado en el riesgo y su aprobación, son necesarios los siguientes elementos:

- Alternativas para el diseño basado en el riesgo: SOLAS I / 5 y MARPOL Anexo I, I / 5 tienen la disposición necesaria para permitir diseños alternativos. Además, existen alternativas posibles relacionadas con la protección contra incendios y en un futuro próximo para los sistemas eléctricos y botes salvavidas.
- Procedimientos de aprobación: Existen una serie de documentos de la OMI cuya función es servir de guía para el proceso de aprobación de diseños alternativos. Además, SAFEDOR desarrolló sus propios procesos de aprobación para diferentes categorías.
- Evaluación de riesgos y criterios de aceptación: Existe una herramienta llamada Evaluación Formal de la Seguridad (FSA, Formal Safety Assessment). Las directrices de la EFS detallan los criterios relacionados con la seguridad de la vida humana, que abordan los riesgos individuales y sociales. Se hablará con más detalle sobre la EFS en el capítulo 3.

1.4.2 Marco teórico para el diseño basado en el riesgo

La ideología es combinar el diseño tradicional con la idea del diseño basado en el riesgo. Describe la integración de la seguridad como un objetivo de diseño adicional.

La idea es encontrar alternativas a las normas prescriptivas actuales, y para ello se utilizan una serie de herramientas que permiten hallar la mejor alternativa para cada buque concreto, de esta manera no se habrá cumplido una restricción impuesta por la normativa actual, si no que se habrá llegado a un objetivo de seguridad preestablecido.

Las herramientas que deberían ser utilizadas por el equipo de ingenieros en el diseño del buque basado en el riesgo son las siguientes:

- Herramientas de predicción: Generalmente se necesitan herramientas capaces de predecir la frecuencia con la que se produce un accidente

determinado y las consecuencias que podría ocasionar. Existen herramientas para todos los tipos de accidentes.

- Teoría de riesgos: Se pueden encontrar en esta categoría los árboles de fallos, árboles de eventos y diferentes herramientas utilizadas para la EFS como por ejemplo la teoría del valor extremo o el teorema de Bayes que, en resumidas cuentas, permiten determinar la probabilidad de que ocurra un suceso A dependiendo de otro suceso B.
- Optimización de modelos: De la misma manera que el diseño tradicional, en el diseño basado en el riesgo también se necesita una manera de optimizar el diseño del buque, añadiendo además un objetivo adicional: la seguridad. Para ello se necesitarán modelos paramétricos del buque.

1.4.3 Equipo de trabajo e ingenieros cualificados

La ingeniería es una disciplina exigente y en constante cambio. Como en cualquier disciplina que se considere en expansión, la experiencia, preparación, la capacidad de resolución de problemas e innovación son cualidades indispensables en el perfil del ingeniero en este campo. Con mentalidad proactiva, SAFEDOR ha ayudado a lo largo de los años a la formación tanto de jóvenes como de ingenieros con experiencia en este ámbito mediante la realización de documentación gratuita y actividades. Además cabe destacar la monografía de Papanikolau *Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications*³ sumamente representativa en los trabajos y principios que han animado al proyecto SAFEDOR, y en consecuencia a la realización de este capítulo del presente trabajo.

³ Véase Papanikolau, A. (2009). *Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications*, Ed. Springer.

Capítulo 2 Diseño del buque para la seguridad

Tradicionalmente, en las fases iniciales del proyecto del buque se trata la seguridad y la navegabilidad mediante la aplicación de los estándares fijados por la normativa internacional y nacional. Esta normativa nos indica que es lo mínimo qué se debe hacer y cómo se debe hacer, y está basada, tal y como se ha mencionado en el capítulo anterior, en la experiencia de antaño, los accidentes sufridos y los errores asumidos.

No obstante, hoy en día están surgiendo nuevos modelos de diseño. El diseño basado en el riesgo no es más que una mentalidad o ideología, que dice que durante las fases de diseño del buque, la seguridad no se debe considerar como una restricción, si no como un objetivo de diseño. Existen una serie de elementos clave que impulsan esta mentalidad proactiva para la seguridad del buque, entre las cuales cabe destacar:

- La fijación de objetivos basados en la seguridad.
- La identificación de peligros (HAZID, Hazard Identification).
- La seguridad durante la operativa del buque (HAZOP, Hazard operational).
- Análisis de riesgos: control de riesgos posibles y probables.
- Relación del coste/beneficio del tratamiento del riesgo en relación al coste total del buque.

La integración de estos elementos en el diseño tradicional del buque da como resultado el denominado “proyecto del buque basado en el riesgo”. Existen ciertas herramientas que facilitan este proceso, como la ya mencionada EFS, que se tratará más adelante.

2.1 Diseño tradicional del buque

Como todo proyecto complejo de ingeniería, el proyecto del buque se trata de un proceso cíclico e iterativo que se puede representar mediante la llamada “espiral de proyecto”.

Se denomina cíclico por que el proceso de diseño puede dividirse en fases, en función de la precisión de la definición del proyecto. Para conseguir los objetivos de cada una de esas fases, es necesario desarrollar los diferentes aspectos que componen el proyecto de un buque.

Es necesario definir un proceso iterativo para garantizar la optimización del proyecto, de manera que en cada paso las características del proyecto mejoren (en un sentido que debe definirse) a las anteriores que se tomaron como punto de partida. Algunas variaciones del diseño inicial, pueden conducir a obtener características peores, o que no cumplen con algunos de los requisitos iniciales. Esto puede deberse a una inadecuada planificación del proceso de diseño, o al insuficiente conocimiento de alguno de los aspectos del proyecto. Las herramientas utilizadas en el proceso deben ser adecuadas a la situación en el proceso de diseño.

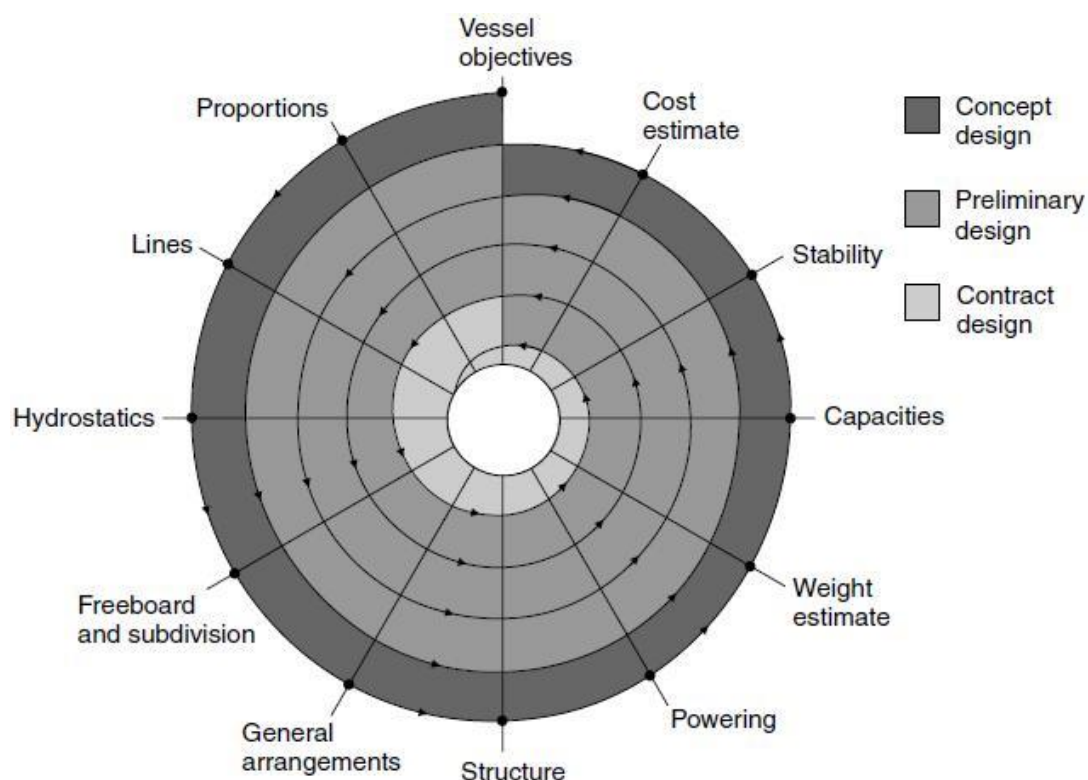


Figura 3: Espiral de diseño del buque. Fuente: <http://arquitecturabuque.blogspot.com/es/>

La espiral de proyecto representa de forma esquemática este proceso cíclico e iterativo. Aparecen todos los cálculos y decisiones que se deben tener en cuenta para cada etapa, así como las revisiones que se deben llevar a cabo al final de cada ciclo. Las diferentes fases que se consideran durante el diseño del proyecto son tres: proyecto conceptual, proyecto contractual y proyecto de construcción.

2.1.1 Proyecto conceptual

La concepción de un buque se aborda normalmente a partir de conocer su propósito, es decir, el motivo para el cual está destinado. El objeto de esta fase es

determinar la viabilidad del proyecto. Se suele partir de unos datos técnicos muy básicos (peso muerto, capacidad de carga, dimensiones principales, velocidad, coeficientes...) para a partir de estos poder determinar la combinación más económicamente rentable.

Los resultados principales del proyecto conceptual son los siguientes:

- Determinación de la viabilidad del proyecto.
- Estimación del coste total de la obra.
- Definición de las especificaciones del proyecto.

El problema de definir el proyecto conceptual desde el punto de vista del armador es la búsqueda de la combinación de mayor rendimiento económico para una flota de buques teniendo en cuenta el volumen de mercancías a transportar por las rutas geográficas que tomará y teniendo en cuenta las limitaciones económicas que impone la inversión que se va a realizar. Es por esto que en esta fase se compararán estas variables para dar con la combinación económicamente óptima.

2.1.2 Proyecto contractual

Esta fase del proyecto consiste en ofrecer soporte técnico al contrato de construcción del buque. Incorpora acciones que contribuyen a comprobar si se cumplen los requerimientos impuestos, tanto comerciales como de seguridad, con los márgenes adecuados. Como resultado de este proceso se obtiene un contrato de construcción que incluye:

- Definición suficientemente precisa de las características del proyecto (disposición general, planta propulsora, potencia eléctrica, sistemas de carga...).
- Costes de la obra.
- Elaboración de una oferta económica del constructor para el armador.
- Definición precisa de las diferentes calidades.

Para empezar este proceso, se suele tomar como punto de partida un buque base ya existente en el mercado, que sea similar al buque deseado y que se conozca su buen funcionamiento. Este buque base servirá de guía durante las primeras fases. A partir de las características del buque base se pueden estimar aspectos del buque a construir como por ejemplo la estabilidad, francobordo, potencia, carga...etc. Una vez establecido el punto de partida, las estimaciones iniciales se irán modificando a

medida que avance el proyecto. Algunos de los aspectos más importantes que se deciden en este proceso son:

- Cálculo de la potencia y propulsión
- Definición de las formas del buque
- Cálculo del peso en rosca y de la posición del centro de gravedad del buque
- Disposición general / Compartimentado
- Cálculo del arqueo y de la capacidad de los tanques
- Maniobrabilidad y comportamiento en la mar
- Definición de la planta propulsora y otros sistemas del buque
- Estabilidad intacto / Estabilidad en averías
- Análisis de costes

El proyecto contractual es de suma importancia, pues el contrato va a definir qué se tiene que hacer y en cuanto tiempo se debe hacer. El cumplimiento de este contrato debe ser imperativo, ya que si el buque final presentado al armador se sale lo más mínimo de este contrato, el armador está en su derecho de declinar la compra, lo cual puede suponer una pérdida enorme para la empresa constructora.

2.1.3 Proyecto de construcción

El proyecto de construcción incluye el desarrollo de todo el proyecto hasta la obtención de toda la documentación necesaria para poder llevar a cabo la construcción del buque. Esta documentación debe ser la requerida por parte de las autoridades y de la Sociedad de Clasificación correspondiente. El proyecto debe asegurar el cumplimiento de las siguientes normativas:

- Convenio internacional para la Seguridad de la Vida Humana en la Mar (SOLAS).
- Convenio internacional de líneas de carga (Francobordo).
- Convenio internacional para prevenir la contaminación de buques (MARPOL, Maritime Pollution).
- Códigos de la OMI.
- Reglamentos de Arqueo.
- Convenio internacional para la prevención de abordajes (COLREG).

Esta fase del proyecto se puede subdividir en dos fases: el proyecto funcional y el proyecto de construcción o de detalle.

- Proyecto funcional: En esta fase se llevarán a cabo los diseños de los diferentes sistemas que componen el buque:
 - Definición de los esquemas y disposiciones funcionales.
 - Definición de materiales y equipos.
 - Desarrollo de los planos constructivos.
 - Aprobación de planos de suministradores.
 - Documentación de pruebas.
- El proyecto de construcción o de detalle: Esta etapa tiene como objetivo elaborar los planos constructivos, por ese motivo se aborda desde una estrategia enfocada en el proceso de construcción por zonas y etapas. Los planos más usuales son:
 - Elaboración de previas.
 - Construcción de bloques.
 - Fabricación de tubería.
 - Construcción de módulos.
 - Montaje de armamento.
 - Cableados.

2.2 Diseño del buque basado en normas

El crecimiento exponencial de la tecnología está impulsando la innovación en el sector del transporte marítimo para satisfacer la demanda de buques cada vez más grandes, más rápidos y más complejos. La seguridad podría ser fácilmente eclipsada y las consecuencias serían desastrosas. Se pueden encontrar evidencias en el caso de los buques de pasajeros de lujo que se construyen hoy en día, cruceros gigantes donde la necesidad de innovación crea desafíos de seguridad sin precedentes que no se pueden llevar a cabo con normativa prescriptiva, por ejemplo, ¿se podría asegurar la evacuación de las más de 8000 personas a bordo del “Symphony of the Seas”, tal y como indica la normativa prescriptiva actual? Es en este momento cuando entra en juego un nuevo paradigma de diseño que trata la seguridad como un objetivo de diseño y no como un simple cumplimiento de normativa. Por un lado, algunos armadores y, en consecuencia, los astilleros y las sociedades de clasificación se están aventurando a explotar los nuevos grados de libertad que ofrece el diseño basado en el riesgo, mientras que a otros les resulta más difícil alejarse de la mentalidad prescriptiva que ha sido profundamente arraigada durante todos estos años.

La necesidad de cambiar la forma en que se aborda la seguridad operacional obliga a darse cuenta de que la industria marina es una "industria de riesgo", por lo que es necesario enfocar la seguridad marítima de una manera más responsable. Esto, a su vez, está allanando el camino hacia cambios drásticos en el diseño y la operación de los buques, y ha servido como base e inspiración para la creación de SAFEDOR.

En la práctica, el objetivo del diseño de buques es cumplir con las expectativas que especifica el armador, al mismo tiempo que cumple con la normativa (de ahí el “diseño del buque basado en normativa”) y garantizar que el proceso constructivo sea lo más rentable posible entrando dentro del marco temporal estipulado por el contrato.

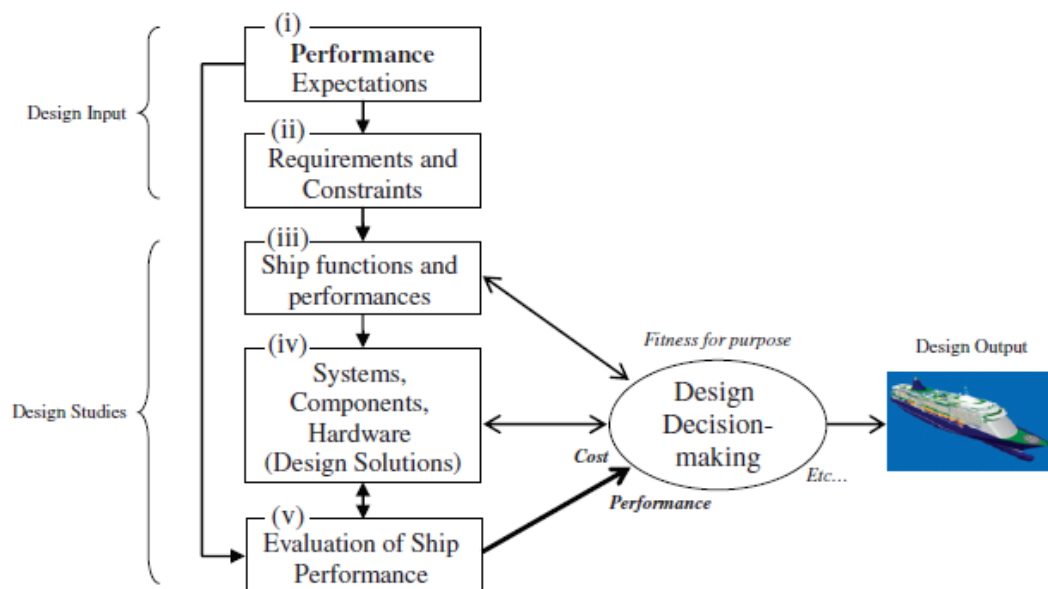


Figura 4: Proceso genérico de diseño de un buque. Fuente: Papanikolau, A. en *Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications*

En la figura 4 se pueden observar lo siguiente: en la primera fase del diseño se crea una expectativa de desempeño del buque, es decir, que es lo que se necesita conseguir. En la segunda fase entra en juego la normativa como una restricción, una piedra en el camino con la que hay que jugar para cumplir lo acordado en la primera fase. En las siguientes fases del diseño se lleva a cabo el estudio del barco. En este punto se decidirán las formas, sus funciones, sistemas y equipos,

componentes, para al final realizar una evaluación global del buque que permitirá al equipo de diseño tomar una decisión.

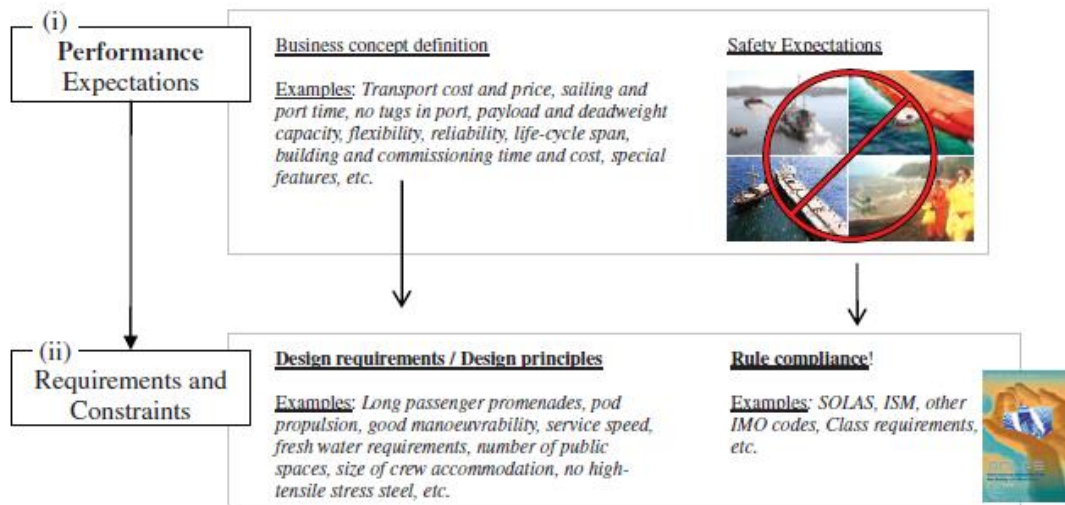


Figura 5: Fase 1 del diseño del buque: concepto y normativa. Fuente: Papanikolau, A. en *Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications*

El objetivo del ingeniero o del equipo de ingenieros que se dedican al diseño y toman parte en el proceso de diseño anteriormente mencionado, es básicamente hacer malabarismos con ciertos factores que son considerados los más importantes y que conforman el buque final, como por ejemplo la presentación técnica, el coste, la logística, los equipos a bordo o la calidad estética. La calidad del buque se verá reflejada en optimizar estos parámetros.

No se puede decir que en esta lista no se tenga en cuenta la seguridad, pero sí que está completamente limitada por la normativa y, por tanto, se trata como una restricción de diseño, como una variable a estudiar para garantizar el cumplimiento de los criterios establecidos.

En las primeras etapas de diseño es donde se toman las decisiones más importantes, se asignan recursos a cada una y todo esto está basado en la experiencia del diseñador. La creatividad de este se utiliza para un mejor aprovechamiento del espacio, unas formas más bonitas o equipo más tecnológico. En el diseño basado en la normativa, el nivel de seguridad, su rendimiento y eficiencia están prescritos por las normas, es decir, la normativa define que valores de seguridad deben alcanzarse para cada caso. A continuación se citan algunos ejemplos de esto:

- Para evitar fallos estructurales: espesores mínimos, márgenes de corrosión, cargas de diseño, etc.
- Para evitar pérdida de estabilidad: requisitos curva GZ, etc.
- Para mitigar las consecuencias de una colisión: introducir mamparos longitudinales en $B/5$, índice A, etc.
- Para mitigar las consecuencias de una varada involuntaria: doble casco, etc.
- Para mitigar las consecuencias de un incendio: índice de fuego \rightarrow 1h de protección contra incendios a $T_{max} = 180^\circ\text{C}$, etc.
- Para evitar que los pasajeros caigan por la borda: poner una barandilla.

Los ejemplos citados anteriormente indican claramente cuál es el camino tomado frente a una necesidad de seguridad. La normativa prescriptiva basada en accidentes ya ocurridos, supone que los accidentes van a ocurrir e intenta simplemente mitigar su efecto o incluso anularlo imponiendo una serie de condiciones al diseño.

Esta visión implica que el desarrollo de diseños "competitivos" se basa en la aptitud del diseñador y no en bases racionales. Es por esto que en la mayoría de los casos los diseños potencialmente buenos no pueden progresar más, ya que no cumplen con esta u otra norma de seguridad.

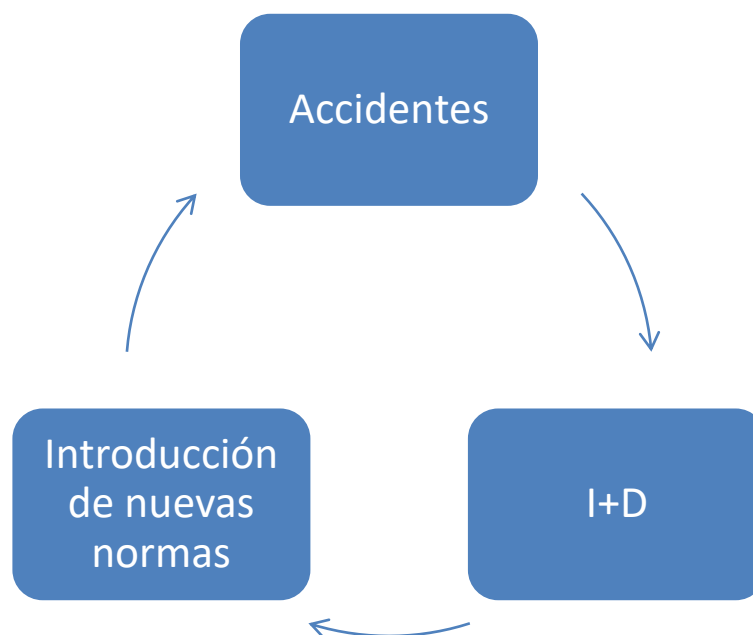


Figura 6: Cada nueva regla aparece a raíz de un accidente. Fuente propia.

Además, el cumplimiento de la normativa prescriptiva implica creer ciegamente que el mínimo nivel de seguridad es suficiente y apropiado para el buque que se está diseñando, pero desafortunadamente no es así. Con esto no se pretende decir que el diseño basado en normas es completamente inútil. Como es de esperar también tiene puntos positivos. A continuación se citan algunos de los puntos positivos y negativos de este método:

Ventajas:

- La normativa refleja el mínimo estándar de seguridad. Este no tiene por qué ser el idóneo para el buque, pero puede ofrecer una idea consistente basada en anteriores buques. Si se utiliza con raciocinio y responsabilidad, nos puede brindar información muy útil.
- La mayoría de estas reglas están basadas en grandes accidentes con consecuencias nefastas. Esto es especialmente útil también para calmar la indignación pública haciendo ver que se toman medidas al respecto.
- Las reglas son bastante fáciles de cumplir y facilitan el cambio de clase/bandera.

Desventajas:

- El hecho de especificar requisitos mínimos, hace que dos buques se consideren con el mismo nivel de seguridad aunque uno de ellos supere con creces el requisito mínimo impuesto por la regla, y el otro simplemente lo cumpla por poco. Esto hace que los diseñadores introduzcan el concepto de “costes de seguridad” y que se llegue a la errónea conclusión de que “la seguridad no es rentable”.
- Además, el proceso de elaboración de reglas se basa en el consenso y refleja compromisos a menudo “injustificables” que desafían la fuente misma del conocimiento, de la que se derivan dichas reglas (experiencial o estadística). Por ejemplo, las estadísticas muestran (ver Fig. 2.5) que el mamparo longitudinal B / 5, utilizado en SOLAS'90 para proporcionar protección contra la inundación de los espacios internos de un barco en una colisión lateral, se incumpliría en el 45% de dichas colisiones.

A pesar de estos puntos negativos, a lo largo de los años, la mayoría de las reglas han demostrado que cumplen razonablemente bien los objetivos de diseño y la mayoría de los cambios y mejoras han sido el resultado de accidentes aislados (por

ejemplo, el ferry MV Estonia en 1994) o cambios significativos en estadísticas de siniestros (por ejemplo, pérdidas de graneleros a principios de la década de 1990 y desarrollo del Capítulo XII del Convenio SOLAS). Sin embargo, en lugar de esperar a que ocurra un accidente para luego actuar rápidamente estableciendo nuevas reglas que en vez de mejorar la seguridad lo que hacen es simplemente tapar un vacío legal, se podría hacer un análisis en profundidad de las causas del accidente para introducir este conocimiento tan pronto como sea posible en el proceso de diseño. Esta ideología, que se propone en el libro de SAFEDOR de Apóstolos D.Papanikolau⁴ se puede ver esquematizada en la figura 6.

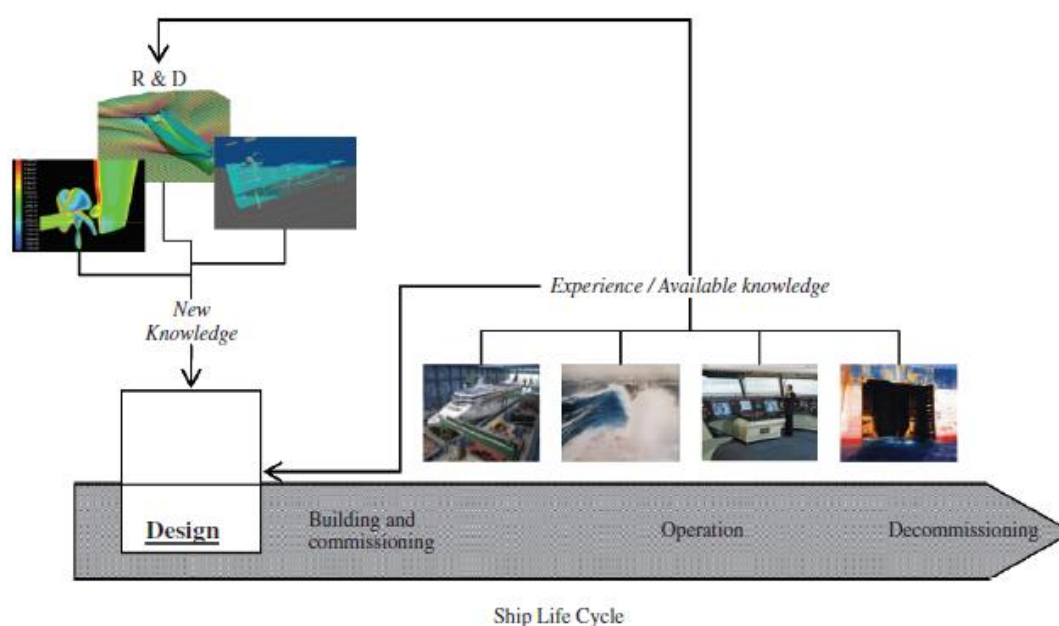


Figura 7: Un punto de vista más “responsable” para el diseño de la seguridad. Fuente: Papanikolau, A. en *Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications*

2.3 Diseño del buque basado en el riesgo

Recientemente ha habido discusiones en la OMI respecto a las normas basadas en objetivos de seguridad, dando lugar al término cuantitativo “Nivel de seguridad”. Este sugiere el nivel de riesgo aceptable para un buque en concreto, y se convierte

⁴ De lectura imprescindible, libro Papanikolau, A. en *Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications* Ed. Springer, 2009

en una orientación para lograr de manera eficiente el objetivo de seguridad deseado, reduciendo costes y tiempo. Se trata pues de una nueva filosofía en el proceso de diseño. Una vez se ha tomado conciencia del asunto y se decide llevarlo a cabo mediante esta nueva filosofía, hacerlo no es tarea fácil. Se trata de ser capaz de cuantificar el riesgo para el ciclo de vida útil completa del barco considerando, durante la etapa de diseño conceptual del buque, dos tipos de medidas de seguridad:

- Medidas de seguridad “pasivas”: relacionadas con el diseño del buque.
- Medidas de seguridad “activas”: relacionadas con la operación del buque.

Esto se debe hacer minimizando costes y tiempo, ya que normalmente se trabaja con un presupuesto y un margen de tiempo acotados. Hay mucho trabajo por delante, pero los beneficios de este trabajo serán increíbles, justificando cualquier inversión económica y de tiempo. Para lograr esto, se deben seguir los siguientes principios:

- Se debe establecer de manera fiable y cuantificable una forma de medir la seguridad. Para ello se debe entender la complejidad de lo que constituye la seguridad. Existen muchos procedimientos para la cuantificación de riesgos, la evaluación y gestión del riesgo como la Evaluación Formal de Seguridad (EFS). La siguiente imagen muestra un proceso de evaluación de seguridad.
- Tal proceso debe ser introducido en el proceso de diseño para permitir la interacción entre la seguridad y los otros factores del diseño del buque (Fig. 7). Como resultado, la armonización de la seguridad en el proceso de diseño brindará información adicional sobre el riesgo y facilitará la toma de decisiones.
- Será necesario el uso de modelos paramétricos del buque mediante un software que permita la implementación de la seguridad en el proceso de evaluación. La optimización se vuelve un caso de optimización con varios objetivos, varios criterios.

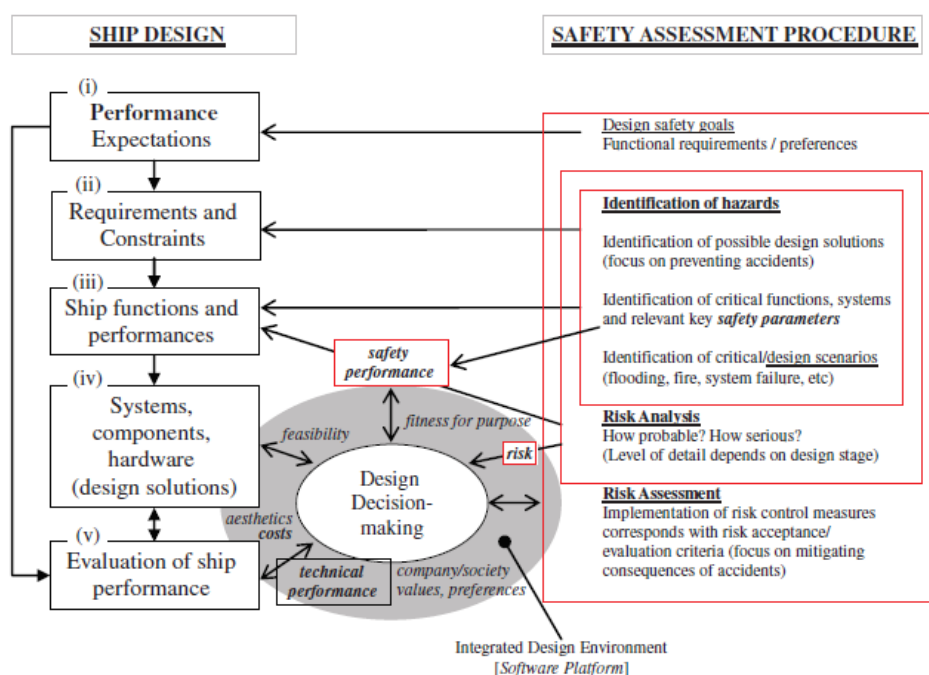


Figura 8: Proceso de evaluación de seguridad introducido en el proceso de diseño tradicional. Fuente: Papanikolau, A. (2009). *Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications*

2.3.1 Conceptos clave del diseño del buque

SAFEDOR define el diseño del buque basado en el riesgo como “una metodología regulada que integra un sistema de evaluación de la seguridad en el proceso de diseño mediante la prevención/reducción de riesgos como un objetivo de diseño, junto con los objetivos de diseño convencionales.”

En relación a esta definición, a continuación se consideran los conceptos clave para la implementación satisfactoria de este método.

Proceso de evaluación de la seguridad

En el proceso de evaluación de la seguridad es muy importante la toma de decisiones. Para una toma de decisiones exitosa, el enfoque que se le dará al proyecto es de suma importancia y para ello se deben observar cuales son las vulnerabilidades más importantes del buque a estudiar. Según la HSE (Health, Security and Environment), la selección del enfoque más adecuado puede verse en los siguientes contextos:

- Etapa de diseño: determinará el nivel de flexibilidad para posibles cambios en el diseño. En la etapa del proyecto conceptual, habrá una gran

flexibilidad para introducir cambios; sin embargo, el conocimiento que se tiene del buque final es puramente teórico. La evaluación de la seguridad se puede ir puliendo y variando a medida que se vaya disponiendo de más detalles del buque, y hasta la construcción.

- Mayor peligro potencial: cuanto mayor sea la exposición a un riesgo que pueda provocar un gran accidente o una pérdida total del buque, menos recomendable será utilizar un enfoque basado en reglas para tomar decisiones.
- Decisiones de riesgo: la evaluación de riesgos será impulsada sobretudo en buques que dispongan de elementos muy innovadores, que por su naturaleza generen incertidumbre, o que sean de especial interés para la compañía.

Definición de objetivos de seguridad

Los objetivos de seguridad están relacionados con el propósito del buque a diseñar. De esta manera, un buque petrolero no estará definido por los mismos objetivos de seguridad que un crucero, pues se deberán considerar diferentes tipos de riesgos. Estos objetivos se pueden dividir dos categorías: objetivos principales y objetivos específicos.

Objetivos principales:

- No deben existir accidentes que conlleven a una pérdida total del buque (colisiones, varadas, explosiones...etc.).
- Un accidente no debe producir pérdidas humanas.
- El impacto medioambiental debe ser el menor posible.
- En caso de accidente, el entorno no se debe ver comprometido.

Objetivos específicos:

- El buque debe mantenerse a flote y estable en todas las condiciones de carga y medioambientales posibles.
- El buque debe mantenerse a flote en caso de vía de agua y/o inundación.
- La estructura del buque debe poder soportar todas las cargas para las cuales ha estado diseñado durante la totalidad de su vida útil.
- En caso de daños estructurales, el buque debe tener suficiente resistencia estructural.

- Debe haber un alto nivel de confort para el pasaje (evitar mareos, ruidos, vibraciones excesivas...etc.).

Es posible que haya otros objetivos específicos que estén implícitos en la normativa. Otros objetivos de diseño pueden incluir el tiempo de respuesta, la velocidad de servicio, la capacidad y, en general, los requisitos que hacen que el barco sea adecuado para su propósito.

Identificación de peligros

Con el fin de lograr objetivos de seguridad generales como los mencionados anteriormente, se deben definir requisitos funcionales más específicos para que el cumplimiento de dichos requisitos garantice el logro de los objetivos de seguridad. De acuerdo con el enfoque basado en el riesgo, la identificación de dichos requisitos debe basarse en una evaluación sistemática y racional de lo que puede impedir el logro de los objetivos de seguridad; por lo tanto, la pregunta "qué puede salir mal" debe ser explorada constantemente y en profundidad. Esto se puede lograr utilizando técnicas de identificación de peligros. Existen varias técnicas y formatos para la presentación de informes según el caso, el propósito y el nivel de conocimiento de diseño disponible (HAZID, FMEA, SWIFT, HAZOP, etc.), las cuales se explicarán en profundidad más adelante.

Identificación de escenarios de alta criticidad

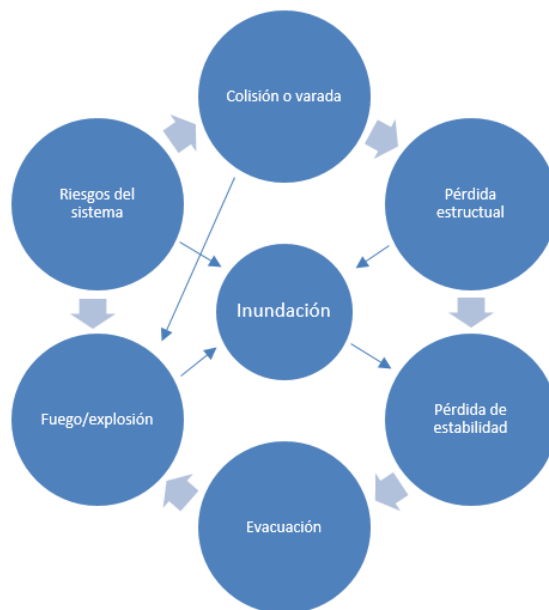


Figura 9: Enlaces estructurales de escenarios de riesgo. Fuente propia.

Otro concepto clave del diseño basado en el riesgo, es la identificación e interpretación de diferentes posibles escenarios de riesgo que pudieran surgir durante el ciclo de vida útil del buque. Se parte de un puñado de escenarios que, considerados individualmente o en combinación, definen un conjunto de riesgo del cual se podría calcular la probabilidad de ocurrencia y sus consecuencias para poder cuantificar colectivamente el riesgo total del buque durante su vida útil.

Existen dos enfoques para la identificación de escenarios: determinista y probabilístico. En el procedimiento determinista, se seleccionan algunos escenarios asumiendo un valor para cada parámetro del escenario donde el barco podría probarse en varios escenarios con peligros que tengan una baja probabilidad de ocurrencia. Por otro lado, el enfoque probabilístico identifica los peligros probabilísticamente. El enfoque probabilístico es más apropiado, ya que existen accidentes de naturaleza poco predecible, como la varada, que se pueden simular mejor con un modelo probabilístico.

Definición de los requisitos de seguridad

Una vez definidos los objetivos de seguridad e identificados los peligros potenciales junto con los escenarios más relevantes para el buque en cuestión, se deben implementar unos requisitos de seguridad. Este proceso es crucial, pues consiste en interpretar los peligros analizados anteriormente y encontrar una manera de evitarlos armonizando unos requisitos de seguridad en el proceso de diseño. Estos requisitos, junto con el resto de requisitos de diseño convencional, serán los necesarios para poder proceder con el diseño del buque.

Capítulo 3 Evaluación Formal de la Seguridad

3.1 Antecedentes

En 1988 el desastre en la plataforma petrolífera Piper Alpha del Mar del Norte, impulsó a la OMI a implementar una metodología que permitiera evaluar y mejorar la seguridad de la industria marítima, que es la llamada "Evaluación formal de la seguridad". El desastre de Piper Alpha es considerado el mayor desastre marítimo de la industria petrolífera en cuestión de pérdida de vidas humanas; 167 personas fallecieron aquel día. La plataforma se construyó originalmente para producir petróleo y más adelante fue convertida para el tratamiento de gas. El desastre se produjo nada más que por un fallo humano: se puso en marcha una bomba de gas que estaba en mantenimiento, lo que produjo una enorme fuga de gas. El gas fugado se incendió y empezó a causar explosiones. Debido a que inicialmente la plataforma estaba pensada únicamente para el tratamiento de petróleo, fue diseñada para resistir incendios, pero no explosiones de gas. La primera explosión destrozó la estructura y llegó hasta otra línea principal de gas que explotó también generando explosiones en cadena hasta que se produjo el infierno.



Figura 10: Desastre de la plataforma petrolífera Piper Alpha, 1988. Fuente:

<http://theconversation.com/>

La orden de mantenimiento de la bomba en cuestión estaba creada, pero en la sala de control no aparecía correctamente. Además, en el momento del cambio de turno, la persona que entraba no fue informada de la situación.

Hoy en día existen muchos sectores de la industria, no solo marítima, tanto internacional como nacional, que están basados en algún tipo de análisis del riesgo. Sin embargo, el término "basado en el riesgo" no se está extendiendo en todas las industrias. Por ejemplo, las reglas de seguridad nuclear en los EE. UU se conocen como "informadas sobre el riesgo". La distinción que se hace al usar el término "informados sobre el riesgo" en lugar de "basado en el riesgo", es que la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) tiene la opción de tomar otras decisiones y no las que se hayan extraído del análisis de riesgos. En la Organización Marítima Internacional (OMI) la situación es similar y se puede ver en el hecho de que el término "criterios de aceptación de riesgos" se sustituye por el término "criterios de evaluación de riesgos". En la OMI, esto refleja el hecho de que la Evaluación Formal de la Seguridad (EFS-FSA), que es el término utilizado para la evaluación de riesgos que permite justificar la implementación de nuevas reglas o modificación de las actuales, no está destinada a automatizar el proceso de decisión, sino a informar a los responsables de la toma de decisiones que acción es aconsejable tomar para cada caso en particular.

Por lo tanto, este sistema a veces se denomina "indirecto", porque los objetivos y los requisitos en los que está basado definen "reglas para las reglas". Puede parecer una contradicción el hecho de crear reglas para las reglas actuales, sin embargo estas no son de carácter obligatorio. La EFS es simplemente una descripción detallada de cómo se debe elaborar y estructurar una nueva regla, considerando antes los todos riesgos previamente estudiados.

3.2 ¿Qué es la Evaluación formal de la seguridad? (EFS-FSA)

La OMI describe EFS como *"un proceso racional y sistemático para valorar los riesgos asociados a la actividad marítima y para evaluar los costes y beneficios de las opciones de la OMI en la reducción de dichos riesgos"* (<http://www.imo.org/>). Cualquier desastre que pueda derivar de una actividad puede prevenirse mediante las metodologías y herramientas adecuadas. La EFS se puede usar para evaluar reglas que se hayan implementado recientemente pero también para comparar las nuevas reglas con las actuales y poder tomar una decisión adecuada de cual utilizar en cada caso. El objetivo de la EFS es lograr un equilibrio entre problemas técnicos y operativos, fallos humanos, seguridad marítima, protección del medio ambiente y costes durante el proceso de diseño y operativo del buque. El término "Formal" se

usa para referirse a “Métodos formales” de evaluación, lo que indica el uso de lógica matemática para el razonamiento del proceso de evaluación.

Normalmente la EFS se basa en un conjunto de datos recopilados de anteriores accidentes para buques o entornos similares. Si dichos datos no están disponibles, entonces se puede utilizar la IMO Casualty Statistics o la opinión de profesionales con experiencia en el sector. Los modelos físicos y analíticos, técnicas de simulación o modelos probabilísticos también pueden usarse como alternativas. De vez en cuando se debe recopilar un registro de los eventos, lo que creará una base de datos para futuras evaluaciones. Por lo tanto, el informe de incidentes constituye una base esencial para la EFS.

Según SAFEDOR, y basado en las directrices de la EFS, se afirma que esta metodología puede ser aplicada mediante un estado miembro o una organización de carácter consultivo ante la OMI, al proponer enmiendas a la seguridad marítima y prevención de la contaminación. Durante el proceso, es necesario enviar informes a la OMI.

No se pretende que la EFS se aplique en todos los casos, pero cuando se trata de casos que pueden tener un gran impacto para la industria y la sociedad (en términos de coste, legalidad, peligrosidad, etc.), su aplicación sería muy relevante. Sin embargo, si se implementan Normas Basadas en Objetivos (GBS), la EFS puede ser obligatoria bajo las condiciones acordadas en una etapa posterior.

La EFS también puede ser útil en aquellas situaciones en las que es necesario reducir el riesgo, pero las decisiones necesarias con respecto a qué hacer no están claras. En estas circunstancias, la EFS permite que los beneficios de los cambios propuestos se establezcan adecuadamente, a fin de que los estados miembros de la OMI tengan una percepción más clara de las propuestas y del por qué se toman las decisiones.

3.3 Pasos de la EFS

La Evaluación Formal de la Seguridad consiste en 5 pasos que están interrelacionados entre sí:

- Identificación de los peligros de cada caso concreto o actividad.
- Evaluar los riesgos con cada peligro identificado.
- Explorar las diferentes opciones para controlar dicho riesgo.

- Realizar una evaluación de costes-beneficio de cada opción de control de riesgos explorada.
- Si es viable, decidir y planificar la mejor opción.

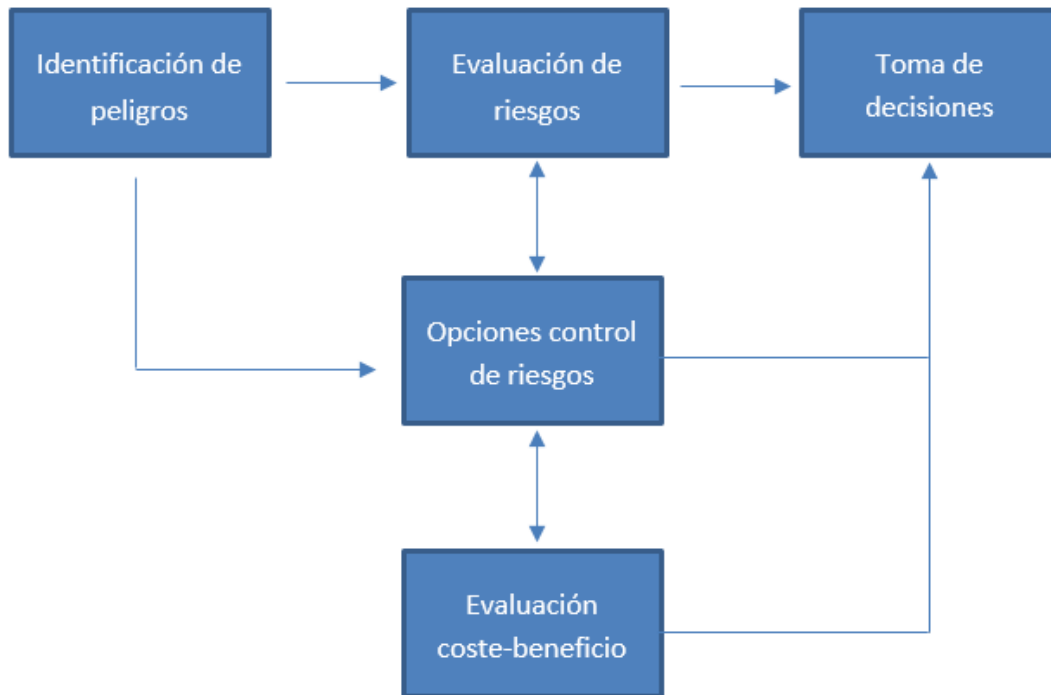


Figura 11: Ilustración de un proceso de Evaluación Formal de la Seguridad. Fuente propia.

Durante todo el proceso, la EFS debe ser:

- Proactiva: anticipar peligros, en lugar de esperar a que los accidentes los revelen, lo que en cualquier caso supone un coste (ya sea por el daño a la propiedad del accidente o por la inversión).
- Sistemático: mediante un proceso formal y estructurado.
- Transparente: debe ser claro y se tiene que poder justificar el nivel de seguridad alcanzado.
- Rentable: se debe encontrar el equilibrio entre la seguridad (en términos de reducción del riesgo) y el coste para las partes interesadas de cada una de las opciones de control del riesgo propuestas.

Para evaluar la seguridad de una operación específica, primero se debe evaluar el riesgo que conlleva dicha actividad. La decisión sobre la aceptabilidad de ese riesgo

se realiza empleando los criterios de aceptación del riesgo, como se explicará más adelante. Este método tiene varias diferencias importantes respecto a métodos de evaluación de seguridad anteriores. En el pasado, la mayoría de las decisiones sobre cambios en la normativa de la OMI se iniciaron como una reacción a un accidente. La decisión de los requisitos de seguridad a imponer se toman como consecuencia de un desastre, centrándose en la pregunta: ¿Qué salió mal? El enfoque de la EFS es proactivo, intentando descubrir antes de que ocurra un accidente: ¿Qué podría salir mal? En el enfoque de evaluación de seguridad anterior, el riesgo normalmente no se evaluaba explícitamente. El enfoque de la EFS trata de averiguar la probabilidad de escenarios de riesgo, que posiblemente se puedan desarrollar a partir de los peligros, y la magnitud de sus consecuencias para calcular el riesgo.

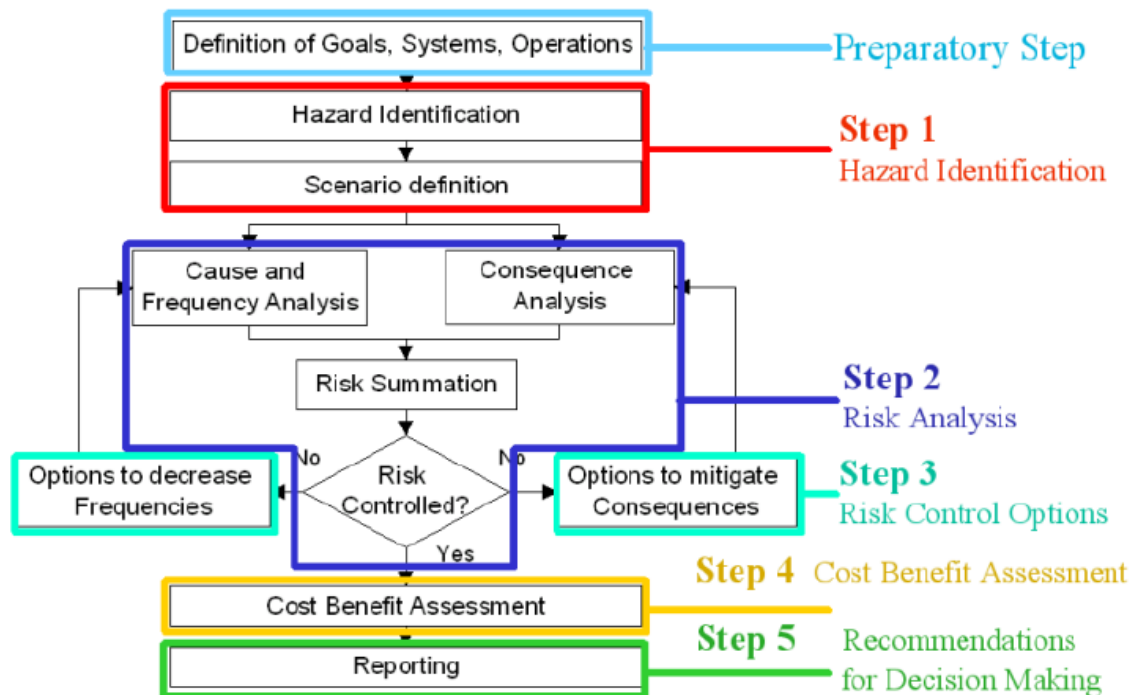


Figura 12: Proceso de la EFS con los pasos 5 diferenciados. Fuente: Risk Management Techniques & FSA: "New Marine Fuels & Safety Risks"

3.4 Paso preparatorio

Antes de empezar con la identificación de peligros, es conveniente hacer primero un paso preparatorio. El objetivo de dicho paso es definir el problema en cuestión junto con toda la información relevante (objetivos, sistemas que intervienen, operaciones que se realizan), para poder tener una visión global del problema a tratar y poder

cruzar esta información con el reglamento actual. Hacer esto también determinará el alcance del proyecto.

Cualquier solicitud de EFS empieza siempre con un paso preparatorio, que es de vital importancia para que el proceso se ejecute bien. Esto se debe a que si no se define bien, o si se define de manera poco precisa por ejemplo las operaciones de riesgo de un barco, esto puede llevar a recomendaciones erróneas que pueden excluir de la evaluación un riesgo muy importante.

Aunque ciertamente es más fácil decirlo que hacerlo. Los estudios de EFS suelen ser de un alcance muy grande y esto hace que suelen presentar ciertas dificultades, como problemas en la coordinación y la gestión del proyecto. Es este motivo por el cual los resultados de este tipo de evaluaciones tardan mucho tiempo en llegar. La complejidad del proceso hace que la EFS no sea una propuesta fácil.

3.5 Paso 1 - Identificación de peligros (HAZID)

3.5.1 Introducción

Un peligro se define como una situación que es potencialmente capaz de causar daños a la seguridad humana, al medio ambiente, al negocio o a la propiedad. Puede ser una situación física (por ejemplo, un camión cisterna es un peligro porque puede chocar con material inflamable en su interior), una actividad (por ejemplo, las operaciones de grúa son un peligro porque la carga puede caerse) o un material (por ejemplo, fueloil es un peligro porque podría incendiarse). En la práctica, el término "peligro" se usa a menudo para la combinación de una situación física con circunstancias particulares que podrían causar daños, por ejemplo, una colisión de un camión cisterna, la caída de una carga pesada desde cierta altura o un incendio de fueloil. La esencia de un peligro es que tiene un potencial de causar daño, independientemente de lo probable o improbable que pueda ser.

El paso 1 también se conoce como identificación de peligros (HAZID). Los objetivos de este paso son:

- Identificar todos los posibles escenarios peligrosos que podrían tener consecuencias significativas
- Priorizarlos por nivel de riesgo.

Por ejemplo, un HAZID de una instalación petrolífera en alta mar podría ser útil para identificar peligros potenciales que podrían generar consecuencias nefastas para el personal (por ejemplo lesiones y muertes), ambientales (derrames de petróleo y contaminación) y económicos (por ejemplo, pérdida / retraso de la producción). La técnica HAZID se puede aplicar en una parte o en la totalidad de la instalación/buque o incluso se puede aplicar para analizar procedimientos. Según el sistema que se esté evaluando y los recursos que haya disponibles, el proceso utilizado para llevar a cabo un HAZID puede variar. Normalmente, el sistema a evaluar se divide en partes, y se guía a un equipo a través de una sesión de “*brainstorming*” para identificar más fácilmente los peligros potenciales asociados a cada parte del sistema. Habitualmente estas técnicas involucran a un grupo de gente experimentada, ya que no es habitual encontrar gente que tenga experiencia real en todos los peligros que existen, y además es más probable que la interacción grupal logre abarcar más cantidad de peligros que una sola persona por mucho conocimiento que tenga en el sector. Los peligros son diversos y existen muchos métodos diferentes para su identificación. Si bien hay métodos que se han convertido en estándares para ciertas aplicaciones en particular (por ejemplo, el análisis AMFE para fallos en el sistema de lastre), no es necesario que cada actividad en concreto deba estar enfocada únicamente con una metodología particular. El líder del equipo de HAZID debe ser lo suficientemente crítico para escoger la metodología más eficiente para cada caso, teniendo en cuenta lo que se pretende conseguir y con qué información se parte. Puede ser una técnica estandarizada, siguiendo un protocolo establecido, una modificación de una o una combinación de varias.

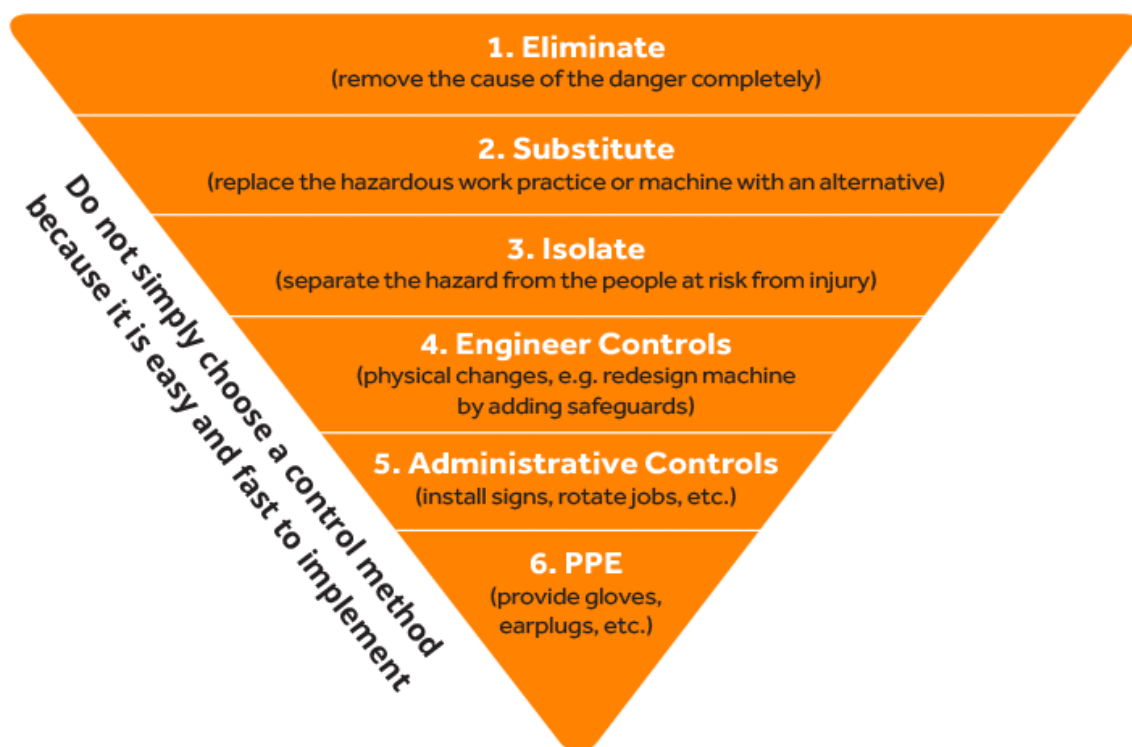


Figura 13: Pirámide jerárquica de gestión del riesgo. Fuente <http://oshpolisasmhn.blogspot.com/2017/03/chapter-6-hirarc.html>

Las siguientes características son esenciales en cualquier HAZID:

- El HAZID debe ser creativo, ampliar el rango de la identificación de peligros que no se consideraron anteriormente.
- Debe utilizar un enfoque estructurado, para tener cobertura completa de los peligros, tanto los más relevantes como aquellos que pueden resultar obvios; también se deben tener en cuenta.
- Cuando sea posible, se debe hacer uso de la experiencia de anteriores accidentes similares.
- El alcance del HAZID debe estar claramente definido, para que quede claro qué riesgos deben incluirse y cuáles quedarse fuera del análisis.

Para HAZID basados en grupos (como HAZOP y SWIFT), lo siguiente también es esencial:

- Deben basarse en la experiencia de personas de diferentes disciplinas, incluida, si fuese posible, la experiencia práctica en la actividad a realizar.
- El líder debe ser ajeno al equipo (es decir, un consultor externo, un especialista en evaluación de riesgos o un líder experimentado de otro

departamento), y tiene la responsabilidad de evitar que el "pensamiento grupal" eclipse a la creatividad.

- Las conclusiones y recomendaciones deben discutirse y documentarse durante la sesión de grupo, de modo que representen las opiniones del grupo en lugar de las de un individuo.

En resumen, la esencia del HAZID es responder la siguiente pregunta: ¿Qué podría salir mal?

Durante la etapa del HAZID, se establecerán los criterios utilizados para seleccionar los peligros y se revisarán los posibles peligros y accidentes. Para este propósito, la instalación se dividirá en varias secciones. Además, los peligros identificados se clasificarán en peligros críticos y no críticos. Es sumamente importante que los peligros considerados como “no críticos” estén claramente documentados para demostrar que realmente no son de vital importancia. HAZID que realmente se utilizan en casos de seguridad en alta mar. Existen documentos que ofrecen descripciones detalladas de las principales técnicas utilizadas en instalaciones de alta mar.⁵

3.5.2 Modelo probabilista vs Modelo determinista

El primer objetivo se puede satisfacer mediante la creatividad y el análisis que tienen como objetivo identificar todos los peligros relevantes. La parte creativa (principalmente un *brainstorming*) es garantizar que el proceso sea proactivo y no se limite solo a los peligros ocurridos en el pasado.

Se ha observado que la mayoría de estudios sobre accidentes marinos (si no todos), han utilizado datos y estadísticas de anteriores accidentes para sus evaluaciones. Es comprensible que si estos datos están disponibles, los perfiles de riesgo se pueden deducir sin la necesidad de crear escenarios. Sin embargo, este uso tiene varias desventajas: la primera y más importante (y esto ha sido reconocido por la OMI) es que toda la filosofía de utilizar datos históricos de anteriores accidentes no es proactiva y, por lo tanto, como ya se ha mencionado anteriormente, no se pueden

⁵ El CCPS (1992) ofrece descripciones detalladas de las diversas técnicas de HAZID utilizadas generalmente cualquier industria. CMPT (1999) y Ambion (1997) resume las técnicas de HAZID que están disponibles para instalaciones marítimas.

usar para construir opciones de control de riesgos de modelos innovadores, ya que es necesario esperar a que ocurran los accidentes para tener datos suficientes.

Otro problema del modelo determinista basado en datos históricos es que estos datos que se extraen del accidente, no son adecuados para darnos información sobre la causa real del accidente ni de los eventos relacionados, simplemente son útiles para llevar a cabo un análisis estadístico, pero nada más. En realidad, poder sacar la causa real de un accidente mediante el uso de datos históricos es realmente complicado, además de que puede tardar años en llevarse a cabo y completarse la investigación. Trabajar con bases de datos que nos brindan una información incompleta sobre la causa de un accidente puede ser perjudicial para el posterior análisis.

Sin embargo, en algunos casos, especialmente en estudios simples de EFS, se pueden usar datos históricos, siempre y cuando se tenga precaución a la hora de identificar las causas del accidente en cuestión. En este escrito se recomienda encarecidamente utilizar como alternativa un método probabilístico para la detección de fallos y creación de escenarios. Este modelo se propone como una alternativa en las directrices de la OMI para la EFS junto con una variedad de métodos, como por ejemplo árboles de fallas, árboles de eventos, diagramas de influencia, etc. Sin embargo, el uso de dichos métodos ha sido bastante limitado hasta ahora.

En las directrices de la OMI suele aparecer bastante el concepto de frecuencia, ya que el riesgo según la OMI se define como “la combinación de la frecuencia de un accidente y la gravedad de sus consecuencias”, donde la frecuencia se indica en términos de accidentes y no de bajas. Según la EFS y su criterio de toma de decisiones, la definición del riesgo es diferente definiéndose como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un accidente y la severidad de la consecuencia.

A simple vista puede parecer que estas dos definiciones de riesgo son similares, pero no lo son. La frecuencia no es lo mismo que la probabilidad, y que haya habido cero colisiones en un puerto no significa que la probabilidad de colisión sea cero. Solo si se pueden analizar un grupo lo suficientemente grande de eventos, su frecuencia puede vincularse a su probabilidad, pero en eventos muy poco frecuentes o nulos no se puede. Por ejemplo: ¿Cuál es la probabilidad de sufrir un accidente si se implementan las nuevas reglas para petroleros propuestas por las IACS? ¿Cuál es la probabilidad de colisión en un canal si se implementa un nuevo sistema de

gestión del tráfico? En estos casos no es posible calcular la frecuencia, ya que no hay datos para ello. ¿Significa esto que las probabilidades de accidentes son nulas? Ciertamente no. Algunos investigadores han sugerido enfoques bayesianos para estimar las probabilidades de eventos para los cuales existe poca o ninguna información para calcular su frecuencia.⁶ En el enfoque bayesiano, la distribución de probabilidad de una variable incierta se actualiza sistemáticamente a partir de una distribución anterior (que es subjetiva) y mediante observaciones del valor de esa variable (que son objetivas). Recomendamos que los enfoques bayesianos se analicen muy seriamente para posibles mejoras en este paso de la EFS. También se recomienda que la palabra "frecuencia" se elimine poco a poco de la terminología de la EFS y que se use la palabra "probabilidad" en su lugar.

Otro punto crítico en este paso es darse cuenta de que solo los peligros que se han identificado durante este paso se evaluarán en los pasos siguientes, dejando fuera del análisis aquellos que no se han tenido en cuenta. Esto es algo peligroso para el estudio, que podría traer consecuencias nefastas, por lo que hay que vigilar que no suceda.

3.5.3 Clasificación de peligros

El segundo objetivo del paso 1 es clasificar los peligros y descartar los escenarios que se consideren de poca importancia. Normalmente la clasificación se hace utilizando información que se tenga sobre el proyecto con la ayuda de expertos en este campo. Además, se utiliza un grupo de expertos para clasificar los riesgos asociados con un escenario específico de accidente, en donde cada experto desarrolla una lista de más grave a menos grave.

3.5.4 Matriz de riesgo

A pesar de lo anteriormente hablado sobre la frecuencia, el cálculo del riesgo según su frecuencia y sus consecuencias se hace mediante el uso de las llamadas matrices de riesgo. Esta herramienta, extraída de la guía de la EFS publicada por la OMI⁷,

⁶ Ver Devanney (1967) para problemas de fallos en equipos navales, entre otros, y Devanney y Stewart (1971) para análisis de estadísticas de derrames de petróleo.

⁷ Véase MSC/Circ.1023, 2002

consiste en una matriz en la cual se categorizarán según la frecuencia y las consecuencias cada uno de los peligros. Esto categorizará los peligros detectados para la posterior priorización de su evaluación.

Por un lado se tiene una tabla con los Índices de frecuencia que indican la probabilidad de que ocurra el suceso a estudiar. Por el otro lado, se tiene una tabla con los Índices de Severidad que indican como de grave es la consecuencia de dicho suceso.

Frequency Index			
FI	FREQUENCY	DEFINITION	F (per ship year)
7	Frequent	Likely to occur once per month on one ship	10
5	Reasonably probable	Likely to occur once per year in a fleet of 10 ships, i.e. likely to occur a few times during the ship's life	0.1
3	Remote	Likely to occur once per year in a fleet of 1000 ships, i.e. likely to occur in the total life of several similar ships	10^{-3}
1	Extremely remote	Likely to occur once in the lifetime (20 years) of a world fleet of 5000 ships.	10^{-5}

Figura 15: Tabla de índices de frecuencia. Fuente: MSC/Circ.1023

SI	SEVERITY	EFFECTS ON HUMAN SAFETY	EFFECTS ON SHIP	S (Equivalent fatalities)
1	Minor	Single or minor injuries	Local equipment damage	0.01
2	Significant	Multiple or severe injuries	Non-severe ship damage	0.1
3	Severe	Single fatality or multiple severe injuries	Severe damage	1
4	Catastrophic	Multiple fatalities	Total loss	10

Figura 14: Tabla de índices de severidad. Fuente: MSC/Circ.1023

Según la OMI⁸:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

$$\text{Log(Riesgo)} = \text{Log(Probabilidad)} + \text{Log(Consecuencia)}$$

⁸ Maritime Safety Committee. (2002). Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC/Circ.1023). Recuperado de <http://www.safedor.org/resources/1023-MEPC392.pdf>

Para facilitar la clasificación y su validación, la OMI recomienda definir los índices de consecuencia y probabilidad en una escala logarítmica. De esta manera se puede establecer un índice de riesgo introduciendo los índices de probabilidad / frecuencia y de consecuencia. Por ejemplo, al decidir utilizar una escala logarítmica, el índice de riesgo para un evento clasificado como "remoto" (FI "*Índice de frecuencia*" = 3) con gravedad "Significante" (SI "*Índice de gravedad*"= 2) sería RI "*Índice de riesgo*"= 5.

Se debe tener en cuenta que de acuerdo con la Figura 14, una fatalidad sería equivalente a 10 lesiones graves, algo que podría ser en cierto modo cuestionable.

Combinando los dos índices anteriores, el tercer índice, el Índice de riesgo, se define de la siguiente manera:

$$\text{Índice de riesgo} = \text{Índice de frecuencia} + \text{Índice de severidad}$$

O

$$RI = FI + SI$$

De esta manera se puede construir la matriz de riesgo para todas las combinaciones de los índices de frecuencia y severidad tal y como indica la figura 16:

Risk Index (RI)					
FI	FREQUENCY	SEVERITY (SI)			
		1	2	3	4
		Minor	Significant	Severe	Catastrophic
7	Frequent	8	9	10	11
6		7	8	9	10
5	Reasonably probable	6	7	8	9
4		5	6	7	8
3	Remote	4	5	6	7
2		3	4	5	6
1	Extremely remote	2	3	4	5

Figura 16: Matriz de riesgo 7x4. Fuente: MSC/Circ.1023

Las matrices de riesgo están pensadas para que se utilicen en la toma de decisiones, sin embargo forman una herramienta simple pero muy importante para el grupo de expertos que participan este primer paso del HAZID.

3.6 Paso 2 - Análisis del riesgo

3.6.1 Introducción

Ha quedado comprobado que el desarrollo de la tecnología es exponencial. Cada vez somos partícipes de avances tecnológicos más importantes, y para que estos avances se produzcan satisfactoriamente deben ir de la mano de otro avance muy importante también: la capacidad de asumir riesgos. El hecho de poder asumir riesgos cada vez más evidentes es una de las claves de la economía moderna y la prosperidad. Los riesgos pueden ser físicos, económicos, sociales, políticos o morales; por lo que la gestión de riesgos es un ejercicio desafiante. Nadie quiere tomar un riesgo incontrolable. Cuando trabajamos por la sostenibilidad y la rentabilidad de una industria, por lo tanto, es esencial estudiar y comprender los riesgos asociados con cada actividad que llevamos a cabo. Ahora la inclinación de la industria es más funcional, es decir, es más importante cual es el objetivo a lograr, que el propio control del riesgo que genera la actividad.

Por lo tanto, ha quedado claro que existe la necesidad de identificar y categorizar los riesgos para proporcionar apoyo a la toma de decisiones con respecto a la elección de las medidas de seguridad a adoptar. La capacidad de definir lo que puede suceder en el futuro y evaluar los riesgos e incertidumbres asociados para más adelante tomar una decisión es el núcleo del sistema de análisis de riesgos. El análisis de riesgos se lleva a cabo de manera cualitativa o cuantitativa. La mejor alternativa es la que ofrece la más alta rentabilidad, sin incidentes que puedan resultar catastróficos para la vida humana, la propiedad ni daños al medio ambiente. Pero es imposible saber con certeza qué alternativa es la mejor, ya que existen muchos riesgos e incertidumbres relacionados con cualquier elección. Por lo tanto, la decisión de elegir una alternativa específica debe basarse en las predicciones de ciertos parámetros mediante un análisis de riesgos.

3.6.2 Tipos de análisis de riesgo

El análisis de riesgos es el procedimiento detallado para analizar la causa de los peligros y sus consecuencias. El análisis de riesgos es una metodología que aplica en su proceso una serie de técnicas tanto cuantitativas como cualitativas.

A veces, para determinar el riesgo de manera cuantitativa es necesario involucrar una teoría, una prueba o un experimento. Cuantitativo significa utilizar un valor

numérico o una palabra para indicar “como de probable o severo” es el riesgo. Por ejemplo, determinar que el riesgo de sufrir un accidente en cierta actividad es de 6 sobre 10, o determinarlo como “catastrófico”, “severo” o “moderado”. Determinar el riesgo de manera cuantitativa tiene ventajas, como por ejemplo que puede ser entendido por todo el mundo. Sin embargo, para poder ofrecer tal enfoque cuantitativo es necesario disponer de datos suficientes. Sin datos no es posible cuantificar el riesgo, por lo que entonces se recurre a uno o un grupo de expertos para que ofrezcan su opinión para tomar las decisiones pertinentes; esto se denomina evaluación cualitativa del riesgo. Tal y como se ha dicho, las decisiones cualitativas pueden cambiar según la persona, es algo completamente subjetivo. A veces también se utiliza una combinación cuantitativa y cualitativa, según se requiera. Un ejemplo de esto es la matriz de riesgo vista anteriormente para el análisis HAZID. Por un lado, si se dispone de los datos suficientes se puede ubicar el suceso a estudiar en la matriz de riesgo mediante el cálculo de su probabilidad de ocurrencia por la severidad de su consecuencia. Sin embargo, si apareciese un escenario que no estaba contemplado y no se tuviesen datos para incluirlo, un grupo de expertos debería, cualitativamente, clasificar este nuevo riesgo según su criterio.⁹

A continuación se muestran una serie de herramientas cuantitativas que se suelen utilizar en el análisis de riesgos de la EFS.

3.6.3 Árbol de fallos (*Fault Tree Analysis, FTA*)

Esta técnica consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del Álgebra de Boole, que permite determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen en él. De esta manera, se puede apreciar de forma cualitativa, qué sucesos son menos probables porque requieren la ocurrencia simultánea de numerosas causas.¹⁰

Por lo tanto, este método consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo (denominado suceso TOP) en sucesos intermedios hasta llegar a sucesos

⁹ Véase Bilal M. Ayyub (2003). *Risk Analysis in Engineering and Economics*, Ed. Chapman and Hall/CRC.

¹⁰ Definición oficial extraída de <http://www.proteccioncivil.es/>

básicos que no se puedan descomponer. La simbología utilizada en este proceso se indica en la figura 17. En esta fase se integran todos los conocimientos sobre el funcionamiento y operación de la instalación con respecto del suceso estudiado.












SÍMBOLOS	SIGNIFICADO DEL SÍMBOLO
	SUCESO BÁSICO. No requiere de posterior desarrollo al considerarse un suceso de fallo básico.
	SUCESO NO DESARROLLADO. No puede ser considerado como básico, pero sus causas no se desarrollan, sea por falta de información o por su poco interés.
	SUCESO INTERMEDIO. Resultante de la combinación de sucesos más elementales por medio de puertas lógicas. Asimismo se representa en un rectángulo el "suceso no deseado" del que parte todo el árbol.
	PUERTA "Y"  El suceso de salida (S) ocurrirá si, y sólo si ocurren todos los sucesos de entrada (E1 B1).
	PUERTA "O"  El suceso de salida (S) ocurrirá si ocurren uno o más de los sucesos de entrada (E1 B1).
	SÍMBOLO DE TRANSFERENCIA. Indica que el árbol sigue en otro lugar.
	PUERTA "Y" PRIORITARIA. El suceso de salida ocurrirá si, y sólo si todas las entradas ocurren en una secuencia determinada, que normalmente se especifica en una elipse dibujada a la derecha de la puerta.
	PUERTA "O" EXCLUSIVA. El suceso de salida ocurrirá si lo hace una de las entradas, pero no dos o más de ellas.
	PUERTA DE INHIBICIÓN. La salida ocurrirá si, y sólo si lo hace su entrada y además se satisface una condición dada (X).

Figura 17: Simbología utilizada para la representación de árbol de fallos. Fuente:
<http://www.proteccioncivil.es/>

El primer paso consiste en identificar el suceso “no deseado” o suceso TOP que estará situado en la parte más alta del árbol y de su definición dependerá todo el desarrollo posterior del árbol. Con este TOP se establecen de forma sistemática todas las causas inmediatas que contribuyen a su ocurrencia definiendo así los sucesos intermedios unidos a través de las puertas lógicas. El proceso de descomposición de un suceso intermedio se repite sucesivas veces hasta llegar a los sucesos básicos o componentes del árbol.

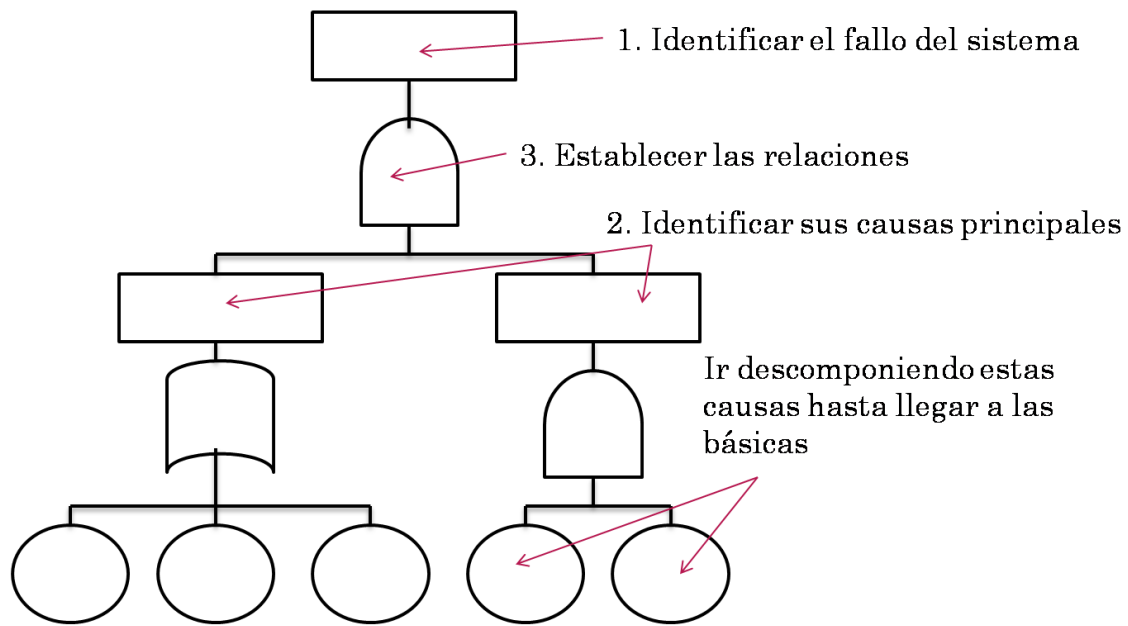


Figura 18: Estructura explicada de un árbol de fallos. Fuente: <https://www.aec.es/>

El desarrollo de FTA es muy útil para comprender la relación que hay entre los sucesos, ya que muestra de una manera muy visual todas las diferentes relaciones que son necesarias para generar el evento principal. El árbol de fallos puede allanar el terreno para la posterior evaluación cualitativa y cuantitativa del riesgo, que se suele aplicar en cuestiones técnicas, por ejemplo, en los procedimientos más complicados en levantar cargas pesadas con grúa teniendo en cuenta todos los procedimientos, elementos de seguridad, operativos y de diseño. La figura 18 muestra un árbol de fallos del llenado de combustible de un automóvil que permite comprender mejor su utilidad así como su desarrollo.

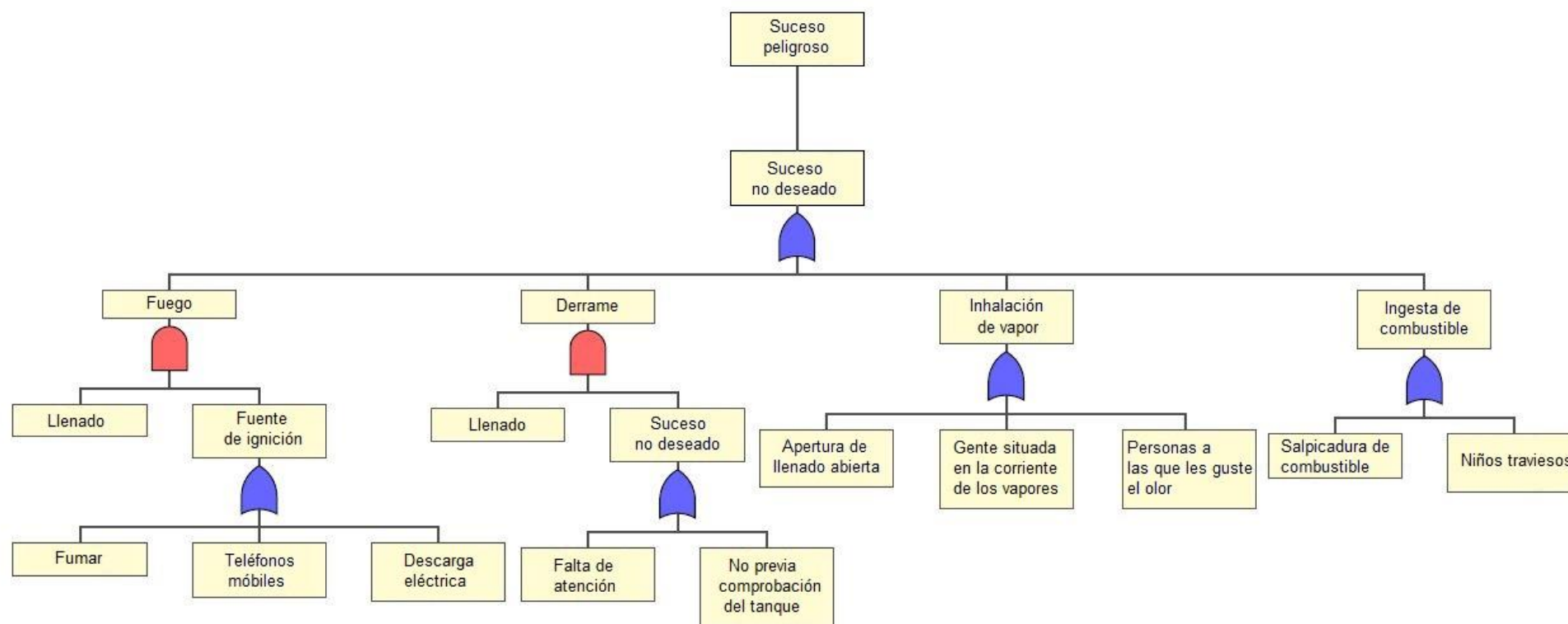


Figura 19: Ejemplo de árbol de fallos, extraído del documento “Formal Safety Assessment in Maritime Industry – Explanation to IMO Guidelines” de Eswara Arun Kishore, 2013

3.6.4 Árbol de sucesos (*Event Tree Analysis, ETA*)

El "árbol de sucesos" es una técnica de algún modo complementaria al "árbol de fallos y errores". Esta técnica desarrolla un diagrama secuencial a partir de sucesos "iniciadores" o desencadenantes de incidentes que se puedan considerar peligrosos o significativos para averiguar todo lo que puede acontecer y, en especial, comprobar si las medidas preventivas existentes o previstas son suficientes para limitar o minimizar los efectos negativos. A diferencia del árbol de fallos, este no va de arriba hacia abajo, si no que va de abajo hacia arriba. Esto significa que se parte de un evento iniciador, y a partir de este se observan las consecuencias para ver si se puede llegar a convertir en un suceso peligroso.

Este análisis da lugar a un modelo probabilístico, donde se puede determinar la probabilidad de un evento que conduzca a la situación peligrosa. El análisis del árbol de sucesos tiene los siguientes pasos:

- 1) Etapa previa, familiarización con la planta.
- 2) Identificación de sucesos iniciales de interés.
- 3) Definición de circunstancias adversas y funciones de seguridad previstas para el control de sucesos.
- 4) Construcción de los árboles de sucesos con inclusión de todas las posibles respuestas del sistema.
- 5) Clasificación de las respuestas indeseadas en categorías de similares consecuencias.
- 6) Estimación de la probabilidad de cada secuencia del árbol de sucesos.
- 7) Cuantificación de las respuestas indeseadas.
- 8) Verificación de todas las respuestas del sistema.

La construcción puede parecer muy simple, pero en realidad no es así. La determinación de la gravedad, la probabilidad y la frecuencia de los incidentes requieren una gran cantidad de información previa. Es imprescindible, antes de iniciar un estudio de este tipo, haber agotado el análisis preliminar de riesgos que permita conocer y controlar la diversidad de situaciones anómalas que puedan acontecer en una instalación, ya sea tanto por factores internos como externos a la misma.

La construcción del árbol comienza por la identificación de los N factores condicionantes de la evolución del suceso iniciador. A continuación se colocan estos como cabezales de la estructura gráfica. Partiendo del iniciador se plantea sistemáticamente dos bifurcaciones: en la parte superior se refleja el éxito o la ocurrencia del suceso condicionante y en la parte inferior se representa el fallo o no ocurrencia del mismo

Se obtienen así 2^N combinaciones o secuencias teóricas. Sin embargo, las dependencias entre los sucesos hacen que la ocurrencia o éxito de uno de ellos pueda eliminar la posibilidad de otros, reduciéndose así el número total de secuencias. La disposición horizontal de los cabezales se suele hacer por orden cronológico de evolución del accidente si bien este criterio es difícil de aplicar en algunos casos.

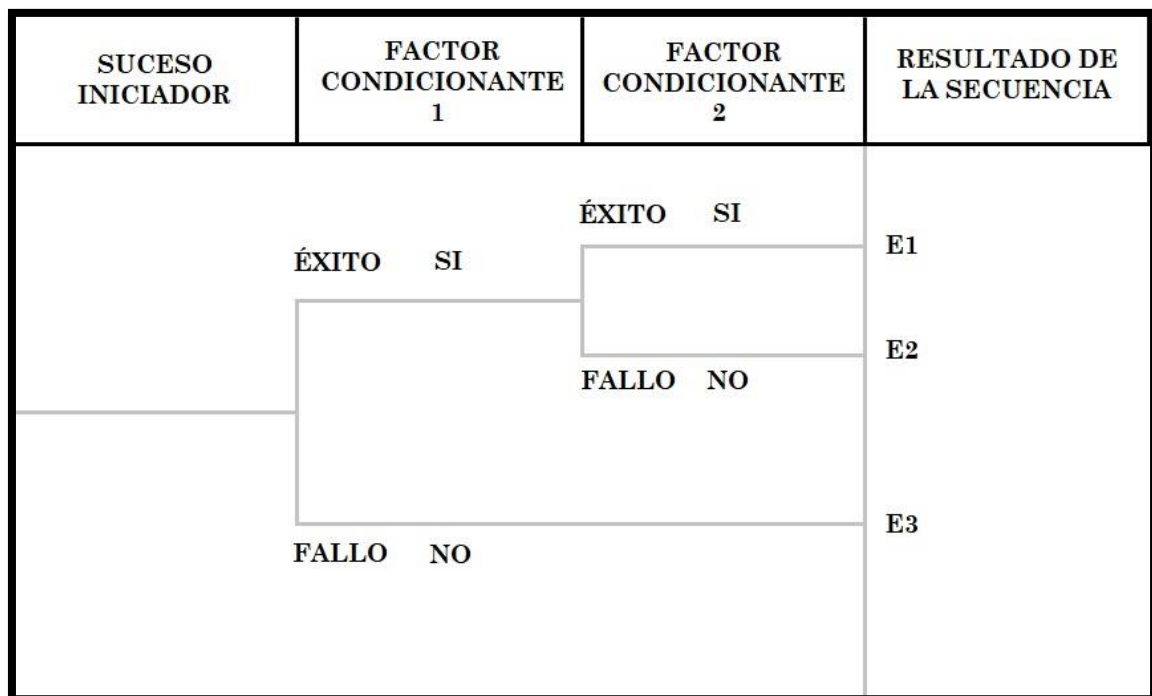


Figura 20: Esquema general de un árbol de sucesos. Fuente propia.

Cada vez que hay un accidente, la industria crea varios informes indicando el número de muertes, lesiones o incidentes de contaminación. Estos informes crean una base de datos con estadísticas de todos los incidentes relacionados con una actividad concreta. Algunos resultados son catastróficos, mientras que otros no son tan graves, pero ocurren con mucha frecuencia. Estos datos son fundamentales

para mostrar tendencias, por ejemplo, 70 fallos en 100 intentos; lo que se traduce en una alta posibilidad de fracaso pero al mismo tiempo no muestran qué condiciones ayudaron a que se produjese el fallo. Estos datos son precisamente los que luego serán de utilidad para determinar mediante un árbol de sucesos el nivel de seguridad o el índice de riesgo de una actividad. Por otro lado, cabe resaltar la dificultad que puede representar interpretar estos datos, ya que hay muchos factores que intervienen. A continuación, en la figura X se muestra un ejemplo de un árbol de sucesos explicado de la probabilidad de ocurrencia de una explosión.

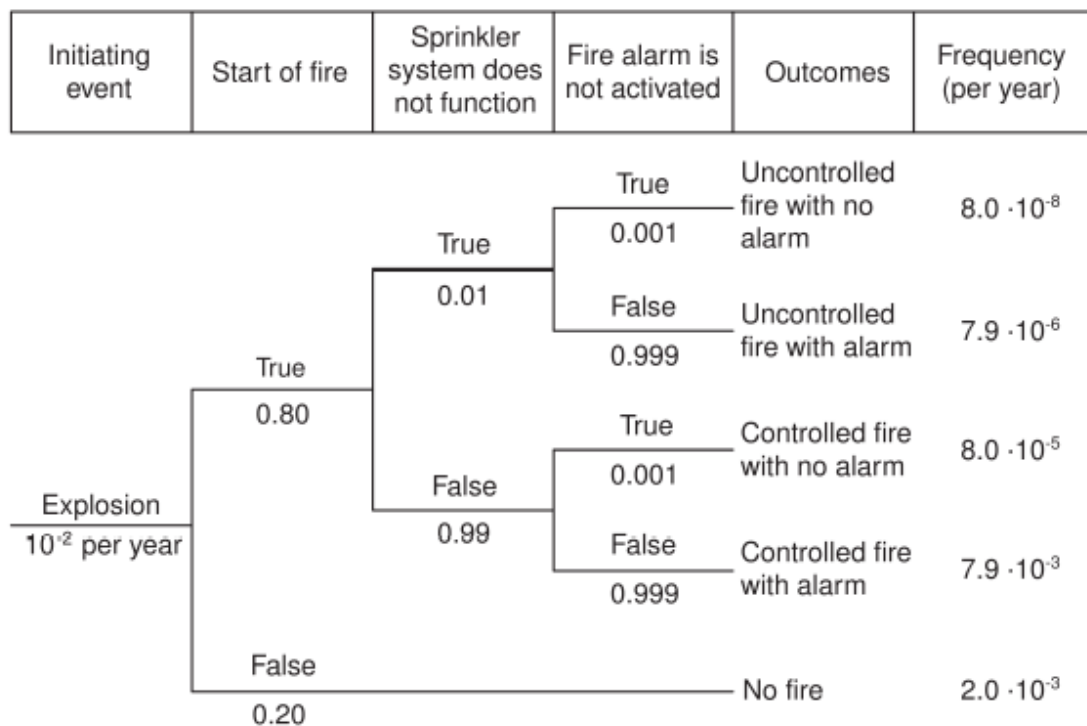


Figura 21: Ejemplo de un árbol de sucesos. Fuente: Rausand.M (2004), NTNU; System Reliability Theory.

En la figura 21 se muestra lo siguiente:

- Suceso iniciador: Se considera una explosión como suceso iniciador, con una frecuencia de 10^{-2} oc/año.
- Factores condicionantes: representan la evolución del suceso de manera probabilística:
 - o Ignición: representa la probabilidad de que la explosión desencadene una ignición y se produzca fuego. Basado en estadísticas, la probabilidad de que ocurra es de un 80%.

- El sistema de rociadores no funciona: una vez se ha generado fuego, la posibilidad de que los rociadores no funcionen es de un 1%.
 - Alarma de incendios no se activa: dado es suceso anterior, la probabilidad de que la alarma de incendios no se active es de un 0,1%.
 - Resultados: Cada una de las ramificaciones ha producido un resultado con una probabilidad de ocurrencia al año asociada.
- Para cada una de las secuencias se procede a su evaluación obtenido por el producto de la frecuencia del iniciador y la probabilidad de los sucesos de la secuencia.

Se concluye pues que los beneficios del árbol de sucesos son los siguientes:

- 1) Identificar exhaustivamente las causas de un fallo para identificar las debilidades del sistema y resolver sus causas.
- 2) Cuantificar la probabilidad de fallo de un diseño propuesto para evaluar su seguridad.
- 3) Identificar los efectos del error humano en un sistema.
- 4) Priorizar los factores condicionantes de un fallo para garantizar la seguridad del sistema.
- 5) Optimizar las pruebas y actividades de mantenimiento.
- 6) Encontrar la probabilidad de fallo del sistema usando datos probabilísticos de las causas que lo suceden.

3.6.5 Análisis de fiabilidad operativa. HAZOP (*Hazard Operability*)

El HAZOP o AFO (Análisis Funcional de Operatividad) es una técnica de identificación de riesgos inductiva basada en la premisa de que los accidentes se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto de los parámetros normales de operación. La característica principal del método es que es realizado por un equipo pluridisciplinario de trabajo. El método se formalizó cuando puso de manifiesto una serie de puntos débiles del diseño de una planta química, por este motivo ha sido hasta ahora ampliamente utilizado en el

campo químico como una técnica particularmente apropiada a la identificación de riesgos en una instalación industrial.¹¹

La técnica consiste en analizar sistemáticamente las causas y las consecuencias de unas desviaciones de las variables de proceso, planteadas a través de unas “palabras guías” (ver figura X)

A continuación se resume el proceso de construcción de un HAZOP:

- 1) La primera fase consiste en delimitar las áreas en las que se aplica esta metodología. En una instalación que se desea estudiar, se definirán una serie de subsistemas con funcionalidad propia para someterlos a estudio.
- 2) En cada subsistema se identificarán una serie de nudos o puntos los cuales serán numerados correlativamente. La técnica HAZOP se aplica a cada uno de estos puntos. Cada nudo vendrá caracterizado por unos valores determinados de las variables de proceso: presión, temperatura, caudal, nivel, composición, viscosidad, estado, etc.
- 3) Para cada nudo, se planteara una palabra guía que definirá de manera breve la desviación que tiene ese punto respecto a su funcionamiento normal o esperado. El HAZOP puede consistir en una aplicación exhaustiva de todas las combinaciones posibles entre palabra guía y variable de proceso, descartándose durante la sesión las desviaciones que no tengan sentido para un nudo determinado.
- 4) Se deben realizar sesiones HAZOP que tienen como objetivo inmediato analizar las desviaciones planteadas de forma ordenada. Durante el trabajo se utilizarán diagramas de tuberías e instrumentación, diagramas de flujo, manuales de operación, o cualquier otro documento valioso.
- 5) Finalmente se elabora un informe final con: esquemas simplificados con la situación y numeración de los nudos de cada subsistema, análisis de los resultados obtenidos, lista de medidas a tomar y una lista de los sucesos iniciadores identificados.

¹¹ Véase

http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta22/guiatec/Metodos_cualitativos/cuali_215.htm

Palabras-Guía	SIGNIFICADO	ALGUNOS EJEMPLOS DE PROBLEMAS TÍPICOS
No	NEGACIÓN O AUSENCIA DE LAS ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	NO FLUJO (fallo de bomba, válvula cerrada, fuga, conducto de aspiración en vacío, obstrucción por sedimentos o cuerpos extraños, etc)
Más	AUMENTO O DISMINUCIÓN CUANTITATIVA	MAS FLUJO (aspiración presionada, válvula atascada abierta, lectura flujómetro incorrecta, etc.)
Menos	Se refiere a cantidades de medición: caudales, presión, temperatura, viscosidad, etc, o actividades: reaccionar, calentar, etc.	
Mayor que o así como	AUMENTO CUALITATIVO Junto a la función deseada se realiza una actividad adicional	MAS TEMPERATURA (suciedad en intercambiador de enfriamiento, fallos del regulador de temperatura, etc)
Parte de	DISMINUCIÓN CUALITATIVA Se realiza solamente una parte de la función deseada	PRESENCIA DE IMPUREZAS (entrada de contaminantes como el agua, aceites, productos de corrosión, fallos de aislamientos, etc)
Inverso	OPOSICIÓN A LA FUNCIÓN DESEADA Utilizable preferentemente a actividades tales como flujo de retroceso, inversión de racción química, etc)	FLUJO DE RETORNO (bomba invertida, comunicación con sobrepresión, fallo de bomba, fallo de válvula antiretroceso, etc)
De otra forma	SUSTITUCIÓN COMPLETA DE LA FUNCIÓN DESEADA Sucede algo totalmente diferente a las finalidades originales	OTRAS ACTIVIDADES DISTINTAS A LA OPERACIÓN NORMAL (arranques y paradas en la instalación, fallos de energía o servicios, emisiones, incompatibilidades, operaciones de limpieza y mantenimiento, tomas de muestras, etc)

Figura 22: Tabla de palabras guía para técnica HAZOP. Fuente: NTP 238, Los análisis de peligros y de operatividad en instalaciones de proceso

Destacando las ventajas del método:

- 1) Permite contrastar distintos puntos de vista de una planta.
- 2) Es una técnica sistemática que puede crear desde el punto de vista de seguridad hábitos metodológicos útiles.
- 3) El coordinador mejora su conocimiento del proceso.
- 4) No requiere una gran cantidad de recursos, únicamente el tiempo de dedicación.

Y como inconvenientes:

- 1) Es una técnica cualitativa. No se puede determinar numéricamente una frecuencia ni tampoco el alcance del mismo.
- 2) Las modificaciones a la planta surgidas del HAZOP deben analizarse con mayor detalle y otros criterios (económicos, etc.).
- 3) Los resultados obtenidos son muy dependientes de la calidad del equipo.
- 4) Es muy dependiente de la información disponible. Puede omitirse un riesgo si los datos de partida son erróneos o incompletos.

3.5.6 Conclusión

La importancia del análisis del riesgo, más allá de su valor conceptual, radica en la gran aportación que tienen en la investigación de accidentes marítimos. Ofrecen una metodología secuencial que permite llegar hasta la causa del fallo y poder hacer una valoración cuantitativa y cualitativa del riesgo,

Las herramientas vistas anteriormente son solo unas pocas de la gran cantidad de técnicas que existen para llevar a cabo un análisis del riesgo. Se han mostrado solo ejemplos de modelos secuenciales, pero hoy en día ya se están utilizando otro tipo de modelos mucho más complejos, como los modelos epidemiológicos o sistémicos, que permiten llegar a una conclusión más realista relacionando la interacción de causas entre sí, o haciendo involucrando la relación hombre-máquina.¹²

3.6 Paso 3 – Opciones de control del riesgo (RCO)

El objetivo del paso 3 es, una vez analizado el riesgo en el paso anterior, proporcionar opciones para controlar dicho riesgo de manera eficaz. Se pueden distinguir cuatro etapas:

- 1) Primero de todo es importante centrarse en los riesgos analizados mediante el árbol de fallos o de sucesos que tengan una alta frecuencia de ocurrencia o un alto índice de severidad. Los sucesos que tengan un alto índice de ocurrencia deben ser controlados independientemente de su severidad, así como los sucesos que queden bajo incertidumbre.
- 2) Identificación de las medidas de control de riesgos (RCM) potenciales.
- 3) Evaluar la efectividad de las medidas de control de riesgos, tanto los riesgos históricos como los recientemente identificados deben abordarse en esta etapa.
- 4) Agrupar las medidas de control de riesgos encontradas bajo una normativa que se pueda aplicar, formando finalmente las RCO.

¹² Véase Jaime Rodrigo de Larrucea (2015), *Seguridad marítima: Teoría general del riesgo*. Ed: Marge books.

Las medidas de control de riesgo (RCM) que se hayan encontrado se combinan en las posibles opciones de control de riesgo (RCO) mediante el uso de ciertos criterios que pueden variar dependiendo del caso. Así pues, el resultado de este tercer paso de la EFS será una lista de RCO que se analizarán en el siguiente paso para determinar su viabilidad económica mediante un análisis costo-beneficio.

En la mayoría de los casos, el último paso de la evaluación formal de la seguridad se basa únicamente en la implementación de una de estas RCO en la toma de decisiones. No es habitual ver la implementación de varias RCO simultáneamente ya que el cálculo de la reducción de riesgo que implica y el análisis costo-beneficio se complica.

Será en el siguiente paso donde se definirá cual es el nivel aceptable de riesgo que permitirá elegir la RCO más adecuada. Es evidente que siempre que escogerá entre las opciones que más tasa de reducción de riesgo tengan, por lo que el cálculo de dicho parámetro es una tarea importante.

El cálculo de la tasa de reducción de riesgo, no está únicamente basada en la información de la que se disponga, si no que contará la opinión de los expertos del equipo. No es un cálculo objetivo, ya que intervienen muchos factores que se deben tener en cuenta y pueden ser complicados de cuantificar. Actualmente existen herramientas complejas, como Delphi, que permiten recoger la opinión de varios expertos del equipo y gestionarlas de tal manera que converja en una solución fiable.¹³

Generalizando, los RCO encontrados deben centrarse en los siguientes objetivos:

- 1) Reducir la frecuencia de fallos a través de un mejor diseño, mejores procedimientos, políticas internas, etc.
- 2) Mitigar el efecto de los fallos para prevenir accidentes.
- 3) Aliviar las circunstancias en que pueden ocurrir fallas.
- 4) Mitigar las consecuencias de los accidentes.

¹³ Véase documento http://www.safedor.org/resources/MEPC_58-INF-2.pdf, EFS para petroleros de crudo, 2008.

Al acabar este paso se tendrá:

- Una gama de RCO que se deberán analizar según su capacidad para reducir el riesgo.
- Una lista de objetivos afectados por los RCO identificados.

Para acabar, en este trabajo se sugiere que las dependencias de los RCO identificados se analicen con mucho cuidado, y se sugiere también que siempre que sea posible, se agrupen los RCO que lo permitan para implementar esta agrupación como un RCO “único”. Se sugiere esto ya que recientemente se ha comprobado la eficacia en términos de reducción de riesgo de introducir varios RCO como uno solo.¹⁴

Table 2: RCOs selected for Cost – Efficiency Analysis	
No	RCO
1	Increased GM
2	Increased Freeboard
3	Reserve buoyancy high up and far out
27	Implementation of guidelines for Bridge Resource Management (BRM)
1+3	Combined Buoyancy addition and increase in GM
1+2+3	Combined Buoyancy addition and increase in GM and Freeboard

Figura 23: Ejemplo de RCO seleccionados en una EFS para cruceros. Se pueden observar combinaciones de varios RCO. Fuente: http://www.safedor.org/resources/MSC_85-17-1.pdf

3.7 Paso 4 - Análisis coste-beneficio

El propósito del paso 4 es identificar y comparar los costes y los beneficios de cada una de las opciones de control de riesgos (RCO) que se hayan encontrado y seleccionado en el paso anterior. Se deberá estimar y comparar la rentabilidad de cada opción de manera cuantitativa en términos de reducción de riesgo/coste.

Este paso es de vital importancia para el estudio, ya que todas las consideraciones cualitativas terminan aquí. También es un paso bastante vulnerable, ya que

¹⁴ Véase documento http://www.safedor.org/resources/MSC_85-17-1.pdf, EFS para cruceros, 2008.

involucra suposiciones de varias personas que pueden llevar a conclusiones erróneas o incluso a la manipulación de datos si estas suposiciones no están debidamente justificadas.

Debido al gran número de variables que existen en este paso, el analista de la EFS debe justificar claramente todos los pasos que haga y todas las suposiciones que realice en la estimación del coste-beneficio. Por ejemplo, en términos de beneficio, se podría suponer que el impacto medioambiental que se reduce con la implementación de una RCO en concreto es X. Esta suposición debe estar claramente justificada.

Cuando se estudia el coste, se suele dividir en costes iniciales y costes de vida útil, y se suele expresar en unidades monetarias. Por otro lado, cuando se estudia el beneficio, el análisis puede ser mucho más complejo, ya que el resultado se puede expresar como una reducción de muertes, beneficio para el medio ambiente o un beneficio económico. Sin embargo, para tener tanto el coste como el beneficio en las mismas unidades, el beneficio se suele acabar expresando también en unidades monetarias.

Como se ha mencionado anteriormente, después de hacer la estimación costo-beneficio, este valor se debe combinar con la tasa de reducción de riesgo de la RCO en cuestión. Hay varios índices que expresan la efectividad de un RCO, pero en la actualidad solo uno está siendo ampliamente utilizado en la EFS¹⁵: este es el llamado “Coste para evitar una fatalidad (CAF, Cost of Averting a Fatality) y se puede expresar en bruto o neto:

Coste bruto para evitar una fatalidad:

$$GCAF = \frac{\Delta C}{\Delta R}$$

Coste neto para evitar una fatalidad

$$NCAF = \frac{\Delta C - \Delta B}{\Delta R}$$

¹⁵ Maritime Safety Committee. (2008). FSA – RoPax ships (MSC 85/17/2). Recuperado de http://www.safedor.org/resources/MSC_85-17-2.pdf

Donde:

- ΔC es el coste por barco y RCO considerada.
- ΔB es el beneficio económico por barco como resultado de implementar la RCO considerada.
- ΔR es la tasa de reducción de riesgo por barco en número de muertes evitadas como resultado de implementar la RCO considerada.

Cabe pensar que definir el ΔR para un RCO específico según lo definido arriba es trivial, pero realmente, no lo es. El número de muertes evitadas en un accidente marítimo puede depender de muchos factores que son extremadamente difíciles de cuantificar, como por ejemplo: la educación de la tripulación, la salud, su ubicación en el momento del accidente, cubierta resbaladiza, etc. A pesar de todo esto, se seguirá suponiendo que para cada RCO en estudio, el ΔR correspondiente se puede estimar con cierta confianza.

El criterio de los 3M\$

El criterio que más se ha utilizado hasta el momento en todos los estudios de EFS presentados a la OMI es el llamado “criterio de los 3M\$”. Consiste en que, para recomendar un RCO determinado, su implementación debe suponer un valor de CAF (en riesgo de muerte, lesiones, problemas de salud, etc.) de menos de 3 millones de dólares o, por lo contrario, el RCO es rechazado.

De esta manera, para un RCO específico, el NCAF debe cumplir el siguiente criterio:

$$NCAF = \frac{\Delta C - \Delta B}{\Delta R} < 3M\$ \rightarrow \Delta C - \Delta B < 3M\$ \cdot \Delta R$$

Por lo tanto, para el GCAF, la fórmula queda de la siguiente manera:

$$\Delta C < 3M\$ \cdot \Delta R$$

Se puede observar que si $\Delta B > 0$ (lo que significaría que el RCO considerado supusiese un beneficio directo para el proyecto), el cálculo del NCAF pasa a ser el mismo que el del GCAF, y las restricciones para la aprobación pasarían a ser menores.

Ejemplo:

En el siguiente caso, se muestra una tabla con 5 diferentes RCO seleccionadas. Se ha calculado el ΔR , ΔC y ΔB de cada una de ellas y posteriormente, mediante las fórmulas anteriormente expresadas, el GCAF y el NCAF.

	ΔR	ΔC (M\$)	ΔB (M\$)	GCAF (M\$)	NCAF (M\$)
RCO A	0.5	1.0	0.5	2.0	1.0
RCO B	0.5	1.5	0.5	3.0	2.0
RCO A+B (1)	0.6	2.5	0.6	4.2	3.2
RCO A+B (2)	0.7	2.0	0.6	2.9	2.0
RCO A+B (3)	0.6	2.5	0.8	4.2	2.8

Figura 24: Tabla con valores imaginarios de los CAF's. Fuente propia.

La tabla muestra dos RCO's, el A y el B. Sus valores de CAF están por debajo del criterio de los 3M\$, por lo que se recomiendan inmediatamente. Si suponemos 3 casos combinados de los RCO's A y B, el caso 1 no se recomendará por que excede el criterio en el NCAF, el caso 2 se recomendará por cumplir el criterio y el caso 3 no se recomendará por no cumplir el criterio para el GCAF.

El estudio costo-beneficio puede llegar a ser extremadamente complejo. Como ya se ha mencionado, muchas variables entran en juego, por lo que existen varios métodos que intentan simplificar esta metodología, pero explicarlos aquí no es el propósito de este trabajo.

Para acabar, se puede concluir que las ventajas de este método son:

- Tiene en cuenta dos de los factores más importantes sobre medidas de seguridad: el coste y la seguridad. Esto hace que el análisis sea muy explícito y objetivo.
- El análisis costo-beneficio ha sido estandarizado por parte de la OMI y las IACS para el cálculo de inversiones en seguridad, por lo que tiene la aprobación de entidades importantes.
- Es especialmente útil para ser aplicado en actividades marinas, ya que es capaz de considerar costes y beneficios de una medida de control de riesgo específica sin conocer los riesgos de la instalación.

Por otro lado, las debilidades son:

- El hecho que valorar la vida humana de forma monetaria se considera poco ético, por lo que la presentación de resultados de este análisis puede provocar reacciones adversas.
- Convertir ciertos factores de riesgo en unidades monetarias no es un ejercicio trivial, hecho que puede influir de manera negativa en el proyecto durante la toma de decisiones si no se le ha otorgado la importancia adecuada.

3.8 Paso 5 - Recomendaciones para la toma de decisiones

El paso final de la EFS tiene como objetivo dar recomendaciones relevantes a los responsables para la toma de decisiones para mejorar la seguridad, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las cuatro etapas anteriores del proceso. Básicamente se expondrá a continuación un criterio de aceptación del riesgo.

Los RCO recomendados deben:

- Reducir el riesgo a un “nivel deseado”
- Ser rentables

Según la OMI, se deben tener en cuenta dos tipos de riesgos durante el criterio de aceptación del riesgo: los riesgos individuales y los riesgos sociales. Definir estos conceptos ayudará más adelante a establecer criterios de aceptación sólidos para las RCO seleccionadas.

Pero si las RCO que se seleccionen deben reducir el riesgo a un nivel deseado o aceptable, surge la siguiente pregunta: ¿Cómo de seguro es lo suficientemente seguro o aceptable? Para responder a esta pregunta, se suelen utilizar diferentes tipos de criterios de riesgo. Uno de los más extendidos es el llamado criterio ALARP.

3.8.1 Criterio ALARP, “tan bajo como sea razonablemente posible”

Según la OMI existen tres regiones en las que el riesgo puede caer. El riesgo inaceptable (por ejemplo, debido a la alta frecuencia y a la alta severidad del accidente) debe prohibirse o reducirse a cualquier precio.

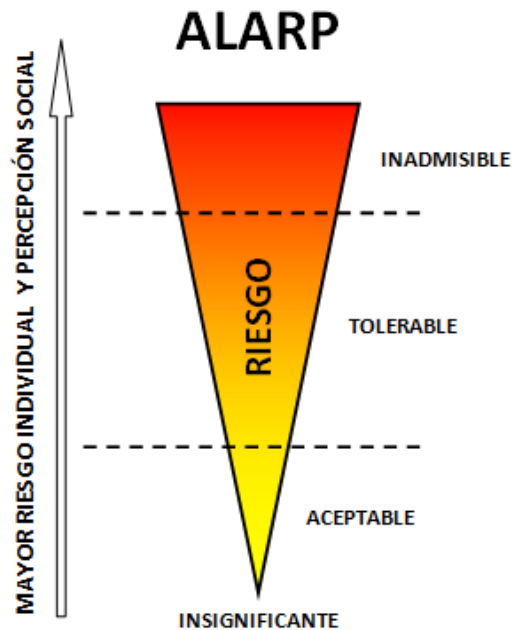


Figura 25: Gráfico ALARP que muestra las diferentes zonas de riesgo. Fuente <https://es.wikipedia.org/wiki/ALARP>

A continuación se encuentra la región ALARP (tan bajo como sea razonablemente posible). Si el riesgo cae en esta región, este debe reducirse hasta que ya no sea razonable (es decir, económicamente viable) reducir dicho riesgo. La aceptación de una actividad cuyo riesgo cae en la región ALARP depende del análisis de costo-beneficio. Finalmente se encuentra la región de riesgo aceptable, donde el riesgo se puede asumir y no es necesario tomar ninguna medida de seguridad adicional.

Resumiendo, las zonas del diagrama son las siguientes:

- Inadmisibles: El riesgo no se puede justificar, salvo en circunstancias extraordinarias.
- ALARP/Tolerable: Si el riesgo cae dentro de esta región, se deberán adoptar medidas adicionales para reducir dicho riesgo hasta un límite aceptable, a no ser que aplicar la siguiente medida requiera recursos desproporcionados en relación a la reducción que proporciona.

- Aceptable: El riesgo se considera insignificante, por lo que puede ser aceptado.

Para aplicar este método, lo primero es asegurarse de que los riesgos no son inadmisibles, y demostrar que son ALARP o aceptables. La HSE ha especificado criterios para identificar los límites entre las zonas y poder así identificar los riesgos. Estos criterios no son inamovibles, simplemente pretende funcionar como una pauta que ayude a localizar los riesgos en una región u otra.

3.8.2 Otros criterios de riesgo

Criterio del riesgo individual

Un riesgo individual se define como el riesgo de muerte, lesión o enfermedad que experimenta un individuo (por ejemplo, un miembro de la tripulación, un pasajero a bordo del barco o cualesquiera que pertenezca a un tercero) en un lugar determinado. El riesgo individual es la persona y la ubicación específica que, además, se considera con una exposición máxima.

El riesgo individual no solo considera la frecuencia y la severidad del accidente (lesión o fatalidad), sino también la exposición fraccional del individuo a ese riesgo, es decir, la probabilidad de que el individuo se encuentre en la ubicación exacta en el momento del accidente.

La IMO utiliza el criterio de la HSE para definir los límites del riesgo mediante la siguiente tabla¹⁶ :

Máximo riesgo tolerable para los miembros de la tripulación	10^{-3} accidentes/año
Máximo riesgo tolerable para pasajeros	10^{-4} accidentes/año
Máximo riesgo tolerable para personas en tierra	10^{-4} accidentes/año
Riesgo insignificante	10^{-6} accidentes/año

¹⁶ Health and Safety Executive (2001). Offshore Technology Report (2001/063). Recuperado de <http://www.hse.gov.uk/research/otopdf/2001/oto01063.pdf>

Cabe resaltar que las cifras indicadas en la tabla son solo cifras indicativas. Por increíble que parezca, ni la OMI ni ninguna otra organización han llegado a una conclusión sobre cuáles deberían ser estos límites, por lo que los límites de aceptación del riesgo es todavía un tema abierto.

Se puede observar que las cifras indicadas en la tabla para dichos límites están expresados en accidentes por año. Esto implica que no tiene en cuenta el número de viajes que se hace cada año. Por otro lado, el hecho de que la proporción accidentes al año permisibles entre la tripulación y los pasajeros sea de 10/1 supone implícitamente que la tripulación realiza aproximadamente 10 viajes más que el pasaje.

Criterio del riesgo social

El propósito de los criterios de aceptación de riesgos de la sociedad es precisamente limitar el impacto del riesgo de los buques en la sociedad y sus propiedades (como por ejemplo los puertos), que puedan verse afectados por las actividades del buque. Así pues, este criterio está enfocado en limitar los riesgos que preocupan a la sociedad por tener un gran índice de severidad (consecuencias catastróficas).

El riesgo social se considera como un “riesgo de muerte” y se suele expresar con un diagrama F-N. Este diagrama (figura 26) indica la relación entre la frecuencia anual de accidentes (F) con el número de muertes (N). Se utiliza para cuantificar el riesgo social basado en el hecho de que la sociedad está menos dispuesta a aceptar un accidente catastrófico que varios accidentes de pocas víctimas.

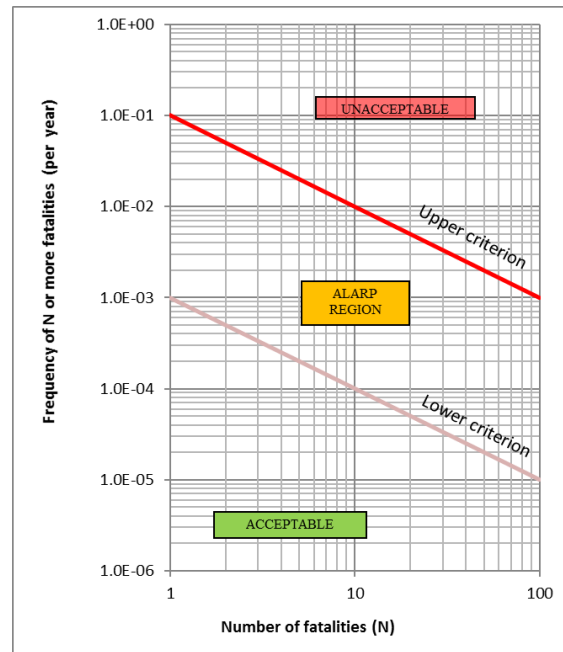


Figura 26: Ejemplo de diagrama F-N. Fuente
<https://blogs.dnvgl.com/oilgas/safety/risk-criteria/>

La línea recta del diagrama F-N se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$F_N = F_1 \cdot N^b$$

Dónde

F_N = frecuencia de N muertes

F_1 = frecuencia de accidentes que involucran una o mas muertes

b = pendiente de la recta (-1 según la OMI)

Los criterios de aceptación de riesgos son un capítulo muy extenso de la EFS y que aún está en desarrollo. Explicar detalles como el porqué de ciertos criterios mencionados anteriormente y sobre por qué la pendiente de la recta es -1 no forma parte del propósito de este trabajo. ¹⁷

¹⁷ Maritime Safety Committee (2006). Formal Safety Assessment - Report of the correspondence group (MSC 81/18). Recuperado de <https://www.transportstyrelsen.se/contentassets/d13d306e3016419a8560a7116535c864/81-18.pdf>

Capítulo 4 Conclusiones

1

Se debe tener presente en todo momento que no existe ninguna actividad con riesgo nulo, de manera que la EFS es el método racional más eficaz para identificar riesgos y poder asumir el más aceptable y rechazar los más catastróficos.

2

La humanidad se debe alejar de la mentalidad de esperar a que ocurra un accidente para posteriormente elaborar la regla que evite que vuelva a suceder. Hay que anticiparse a este desastre, y el primer paso a dar es tomar conciencia de ello. Mentalizarse de la importancia que tiene la seguridad en la industria puede hacer que se eviten muchas muertes innecesarias.

3

El desarrollo tecnológico avanza a una velocidad inimaginable. Sin embargo, las reglas que controlan el uso de esta tecnología fueron creadas cuando esta era mucho más anticuada. Es precisamente este hecho el que nos demuestra que las normas de seguridad deben avanzar al mismo tiempo que el desarrollo tecnológico, ya que aquellas reglas que resultaron útiles en el pasado, es posible que ahora no lo sean.

4

La OMI se dio cuenta de esto y decidió financiar el llamado proyecto SAFEDOR, el cual tiene como función principal la creación de una nueva metodología que integra la seguridad en el proceso de diseño de buques como una variable más. También tienen la tarea de armonizar dicha metodología con el diseño tradicional.

5

Se recomienda encarecidamente pasar de un “diseño basado en normas” a un “diseño basado en el riesgo”. Basar un diseño en normas preestablecidas, hace que dos buques diferentes tengan el mismo nivel de seguridad cuando realmente uno tiene más necesidades que el otro, o incluso necesidades diferentes. Esto no significa que el diseño basado en normas esté obsoleto; las reglas nos ofrecen un estándar mínimo de seguridad que puede ser altamente útil como punto de partida en un proceso de diseño, pero utilizar estas reglas ciegamente como fuese la única necesidad de seguridad del buque, puede conllevar efectos desastrosos.

6

Es altamente útil definir unos objetivos de seguridad al inicio del proceso de diseño, ya que permitirá detectar las necesidades de cada buque en concreto, pues un petrolero no tiene las mismas necesidades que un crucero.

7

Las técnicas como HAZID y HAZOP han demostrado ser muy útiles para la identificación de peligros de la EFS. Existen muchas otras técnicas tanto cuantitativas como cualitativas, pero la verdadera eficacia se halla en la utilización simultánea de ambos tipos de técnicas. Las cuantitativas nos puedes ofrecer datos objetivos y reales basados en anteriores acontecimientos que son de gran ayuda, pero no sirven de nada si estos datos no se saben interpretar. Es por esto que un enfoque cualitativo puede acabar identificar el peligro y solventar el problema.

8

Las comisiones oficiales de investigación van a proporcionan una información valiosísima mediante los resultados de sus investigaciones. Sus resultados pueden ser utilizados en análisis cuantitativos y cualitativos de la metodología de la EFS.

9

Ha quedado claro que llevar a cabo los pasos de la EFS nos es cosa de una sola persona. En la mayoría de casos la técnica del “brainstorming” aporta un gran valor al proceso, ya que difícilmente una única persona tendrá la experiencia suficiente en todos los ámbitos para poder detectar todos los peligros posibles y no pasar ninguno por alto.

10

“Probabilidad” no es lo mismo que “frecuencia”. Que un suceso no haya ocurrido nunca (frecuencia 0), no significa que la probabilidad de que ocurra sea 0. Sustituir el concepto de frecuencia por el de probabilidad en la EFS es un gran paso para mejorar la seguridad de la industria marítima.

11

La EFS acaba siendo un instrumento para luchar contra la producción de los siniestros marítimos. Esta metodología no trata de corregir las causas de dichos sucesos, si no que trata de evitar que estas causas se lleguen a producir antes de que el siniestro pueda suceder. Por otro lado, permite una evaluación racional de la seguridad marítima que a su vez permite la creación de nuevas normas, ya que la EFS también ofrece la posibilidad de hacer comparaciones costo-beneficio de una manera transparente para comparar cual es la más eficaz y económicamente viable.

Bibliografía

Monografías y artículos:

- Det Norske Veritas (2001). *Marine risk assessment, offshore technology report*. Health & Safety Executive
- Eswara, A.K. (2013). *Formal Safety Assessment in Maritime Industry – Explanation to IMO Guidelines*.
- García, J.; Gutiérrez J.E. *Apuntes de la asignatura de Proyecto del buque y artefactos navales*. Universitat de Politècnica de Catalunya.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (1999). *NTP 328 Análisis de riesgos mediante el árbol de sucesos*.
- International Maritime Organization (2002): *Guidance on the use of human element analysing process (heap) and formal safety assessment (fsa) in the imo rule making process*, MSC/Circular 1022; MEPC/Circular 391.
- International Maritime Organization (2002): *Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process*, MSC/Circular 1023; MEPC/Circular 392.
- Kontovas, A.; Psaraftis, N. (2008). *Formal Safety Assessment: A critical review*. Laboratory for Maritime Transport, Greece.
- Maritime Safety Committee. (2009). *FSA - Dangerous Goods Transport with Open-Top container vessels*, MSC 87 / Informe 2.
- Papanikolau, A. (2009). *Risk-based Ship Design: Methods, tools and applications*. Ed. Springer.
- Rausand, M (2004). *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications*. Ed. Wiley.
- Rodrigo de Larrucea, J. (2015). *Seguridad marítima: Teoría general del riesgo*. Ed. Marge books.

Rodrigo de Larrucea, J. (2018). *La investigación en seguridad: Del Titanic a la Ingeniería de la Resiliencia*. Ed. Marge Books.

Rodrigo de Larrucea, J. (2017). *El análisis y la gestión del riesgo a partir de la Evaluación Formal de la Seguridad (EFS/FSA): un nuevo modelo de seguridad portuaria*. Ed. Marge Books.

Páginas web:

Todas las páginas web citadas a continuación han sido consultadas durante los meses Marzo, Abril y Mayo del 2019.

<http://www.bureauveritas.es/services+sheet/hazop-estudiosriesgosoperabilidad>

<http://www.imo.org/es/OurWork/Paginas/Home.aspx>

<http://www.imo.org/en/OurWork/safety/safetytopics/pages/formalsafetyassessment.aspx>

<http://www.imo.org/es/OurWork/Safety/Paginas/Default.aspx>

<http://www.imo.org/en/ourwork/safety/safetytopics/pages/goal-basedstandards.aspx>

<http://www.bureauveritas.es/services+sheet/hazid->

<http://www.safedor.org/resources/index.htm>

<http://www.safedor.org/about/index.htm>

http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta22/guiatec/Metodos_cualitativos/cuali_33.htm

http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta22/guiatec/Metodos_cuantitativos/cuant_252.htm

<https://cordis.europa.eu/project/rcn/75808/reporting/en>

<https://safety4sea.com/imo-msc-develops-goal-based-standards-for-oil-tankers-and-bulk-carriers/>

<https://www.shipjournal.co/index.php/sst/article/view/30/101>

http://www.shipstab.org/files/Proceedings/ISSW/ISSW_2008_Daejeon_Korea/ISSW_2008_s08_p1.pdf

